Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt

Altersbestimmung von Grundwasser durch Tritium/Helium-Methode und hydraulische Altersberechnungen im Jahr 2024

Erläuterungsbericht

November 2024

BJÖRNSEN BERATENDE INGENIEURE

Björnsen Beratende Ingenieure Erfurt GmbH
Standort Leipzig
Dohnanyistraße 28, 04103 Leipzig
Telefon +49 341 962759-0,
sekretariat_leipzig@bjoernsen.de
November 2024, NT, 2023330.65

Inhaltsverzeichnis

Erläuterungsbericht

1	**Einleitung**	**1**
1.1	Veranlassung	1
2	**Datengrundlage**	**1**
3	**Grundwassermessstellen**	**1**
3.1	Lage der Grundwassermessstellen	1
3.2	Beprobung der Grundwassermessstellen	2
4	**Methodik**	**3**
4.1	Laboruntersuchungen	3
4.1.1	Vor-Ort- und Standardparameter	3
4.1.2	Edelgase und Tritium	3
4.2	Hydraulische Altersbestimmung	3
4.2.1	Ermittlung der Strombahnen	4
4.2.2	Sickerwasserzeit in der ungesättigten Zone	5
4.2.3	Exponential-Ansatz	5
4.3	Altersbestimmung durch die Tritium-Helium-Methode	8
5	**Ergebnisse**	**9**
5.1	Hydrochemische Charakterisierung	9
5.1.1	Vor-Ort-Parameter	9
5.1.2	Hauptionen	10
5.2	Hydraulische Alter	10
5.3	**T/He-Altersdatierung**	12
6	**Gesamtdatensatz**	**16**
6.1	**T/He – Alter und hydrogeologische Parameter im Bezugsraum GWK**	17

6.2 **Vergleich T/He-Alter und hydraulische Alter** 19

6.3 **Korrekturansatz Grundwasserneubildung** 20

6.4 **Korrekturansatz Porosität und Grundwasserneubildung** 21

6.5 **Multiple-Regressionsanalyse (PLS-Modell) zur Berechnung des Grundwasseralters** 23

6.6 **Zusammenhang zwischen Nitratabbau (N_2/Ar-Methode) und T/He-Alter** 24

7 **Zusammenfassung und Fazit** **25**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage der Grundwassermessstellen innerhalb der Grundwasserkörper und den Grundwasserbilanzgebieten. 2
Abbildung 2: Strombahnen zu den GWM. 4
Abbildung 3: Querschnitt durch den Grundwasserleiter und Fließpfadkonzept nach dem Exponentialmodell (aus [16]). 5
Abbildung 4: Vor-Ort-Parameter während der Beprobung der GWM. 9
Abbildung 5: Anteil der Ionen am Gesamtionenäquivalent. 10
Abbildung 6: Strombahnlängen für den Datensatz 2024 11
Abbildung 7: Sickerwasseralter in der ungesättigten Zone unter Verwendung der ArcEGMO-Grundwasserneubildungsraten (oben), hydraulisches GW-Alter in der gesättigten Zone (Mitte) nach der Exponential-Methode, Filtertiefe wird berücksichtigt. Unten: Gesamtalter des Grundwassers. 12
Abbildung 8: Tritium und durch dessen Zerfall gebildetes tritiogenes Helium. 13
Abbildung 9: Mittleres Grundwasseralter nach der T/He-Methode für den Datensatz 2024. 14
Abbildung 10: Anteile von jungem Grundwasser (< 75 Jahre) 14
Abbildung 11: Räumliche Darstellung der T/He-Alter für die GWK MBA 1 und OT 1 sowie den Strombahnen zu den GWM. 15
Abbildung 12: Diagramm zur Veranschaulichung dominanter He-Einträge in den untersuchten Messstellen: Ne/He-Konzentrationsverhältnisse vs. $^{3}He/^{4}He$-Verhältnisse in Bezug zu frischem, luftgesättigtem Grundwasser (hellblauer Kreis). Aus T-1. 16
Abbildung 13: Übersicht über den Gesamtdatensatz innerhalb der Grundwasserkörper 17
Abbildung 14: T/He-Alter für den Gesamtdatensatz 18
Abbildung 15: Räumliche Verteilung der T/He-Alter innerhalb der Grundwasserkörper 18
Abbildung 16: Boxplots zu Parametern, die das Grundwasseralter in einer Grundwassermessstelle beeinflussen, sowie das T/He-Alter (unten rechts). 19
Abbildung 17: Vergleich zwischen T/He-Alter und hydraulischem Alter mit Exponential-Ansatz. 20
Abbildung 18: Zusammenhang zwischen Mittlerer Grundwasserneubildung aus dem ArcEGMO Datensatz und Alters-Residuen (Differenzen zwischen hydraulischem Alter und T/He-Alter) mit logarithmischer Regression (gestrichelt: Datensatz bis einschl. 2024, gepunktet: Datensätze einschl. 2023 bzw. einschl. 2022). 21
Abbildung 19: Vergleich der hydraulischen Alter zum T/He-Alter ohne Korrekturansatz (links), mit Korrekturansatz Grundwasserneubildung (Mitte) und Korrekturansatz Grundwasserneubildung und Porosität (rechts). Die Farben entsprechen den GWK wie in Abbildung 18. 22
Abbildung 20: Anwendung der multiplen Regressionsanalyse auf den Gesamtdatensatz (2020 bis 2024). Links: Vergleich der T/He-Alter mit den prognostizierten Grundwasseraltern mit vier Parametern Filterunterkante, Redox-Potential, elektrische Leitfähigkeit und Strombahnlänge. Rechts: mit zwei Parametern Filterunterkante und Redox-Potential. 24
Abbildung 21: Vergleich zwischen Nitratabbau (abgeleitet aus der N_2/Ar-Methode) und dem T/He-Alter als Anteil der Nitrat-Ausgangskonzentration (links) und dem absoluten Nitratabbau in mg/l (rechts). 25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Geometrischen Parameter der GWM zur Berechnung der hydraulischen Alter nach dem Exponential-Ansatz. Datenquelle der Bezugshöhen für die Aquifer-Unterkante (SVZ: Schichtenverzeichnis der Messstelle, sonst Bohrung-ID aus der Landesbohrdatenbank). 7

Tabelle 2: Ermittelte Porositäten für die jeweiligen Grundwasserkörper zur Bestimmung des hydraulischen Grundwasseralters in Kombination mit dem Korrekturansatz Grundwasserneubildung. Die Werte in Klammern beziehen sich auf MAE bzw. NSE für den gesamten Datensatz. 22

Tabelle 3: PLS-Modell Parametrisierung mittels Koeffizienten und Wichtigkeit der Variablen (VIP). 24

Tabelle 4: Zusammenstellung der verschiedenen Altersbestimmungen für den Datensatz 2023 (T/He-Alter, Hydraulisches Alter (Exp.-Modell), Korrigiert mittels der Grundwasserneubildung, PLS-Modell. 26

Anlagen

Reihe A: Übersichten und Zusammenstellungen

A-1 Protokolle der Messstellenbeprobung 2024

A-2 Ergebnisse der Analysen der Vor-Ort und Standard-Parameter 2024

A-3 Gesamtdatensatz (MST-Eigenschaften, Hydrogeologische Parameter, T/He-Alter, hydraulische Alter und Korrektur, PLS-Alter, Hydrochemie, N/Ar-Daten)

A-4 Mögliche Ursachen für die Differenz zwischen T/He-Alter und hydraulischen Alter für den Gesamtdatensatz

Teilberichte

T-1 Erläuterungsbericht zur Altersbestimmung mittels T/He (Isodetect GmbH)

Verwendete Unterlagen

[1] Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW) et al.: Merkblatt Grundwasserprobennahme, Halle (Saale), 2004.

[2] Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW): Daten zu Hydroisohypsen, Online-Ressource: https://gld-sa.dhi-wasy.de/GLD-Portal/, Zugriff am 20.04.2021.

[3] GEO-data im Auftrag des LHW: Grundwasseruntersuchungen 2020 auf 3H-(Tritium) und 3He-(Helium) in Sachsen-Anhalt – Vergleich analytische und hydraulische Altersbestimmung, Garbsen, 2021.

[4] Björnsen Beratende Ingenieure Erfurt GmbH im Auftrag des LHW: Altersbestimmung von Grundwasser durch 3H/He-Methode und hydraulische Altersberechnungen, Leipzig, 2021.

[5] Björnsen Beratende Ingenieure Erfurt GmbH im Auftrag des LHW: Altersbestimmung von Grundwasser durch 3H/He-Methode und hydraulische Altersberechnungen - Ergebnisse aus den Untersuchungen 2020, 2021 und 2022, Leipzig, 2022.

[6] Björnsen Beratende Ingenieure Erfurt GmbH im Auftrag des LHW: Altersbestimmung von Grundwasser durch 3H/He-Methode und hydraulische Altersberechnungen, Leipzig, 2024.

[7] Fugro im Auftrag des LHW: Aktualisierung bodenkundlich-hydrogeologischer Datengrundlage im Rahmen der Fortschreibung Nährstoffmodellierung mit GROWA-WEKU-MEPhos, Torgau, 2017.

[8] ESRI: ArcGIS Dokumentation zum Toolset „Grundwasser“, Online-Ressource: https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-groundwater-tools.htm, Zugriff am 22.07.2021.

[9] GEOS im Auftrag des LHW: Aufbereitung von Datengrundlagen zur Ermittlung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung für Sachsen-Anhalt (2018/2019), Halsbrücke, 2019.

[10] Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt: Digitales Geländemodell 5x5 m, Online-Ressource: https://www.lvermgeo.sachsen-anhalt.de/de/dgm5.html, Zugriff am 20.04.2021.

[11] Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW) und BAH: Ermittlung hydrologischer Bemessungs-/Bewirtschaftungsgrundlagen für das Land Sachsen-Anhalt auf der Basis des Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO, Berlin 2015. Daten aus der Überarbeitung/Fortschreibung des Projektes (2017/2018).

[12] DHI-Wasy im Auftrag des LHW: Erweiterung der Modelle FEFLOW und WBalMo BRV Drömling (2019/2020) – unveröffentlichter Arbeitsstand Sept. 2023.

[13] Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hydrogeologische Übersichtskarte 1:250.000 (HUEK250), Hannover 2013.

[14] Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum in Deutschland, Rasterdatensatz 250 x 250 m, Hannover 2014.

[15] Förderprogramm der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Arbeitshilfe zur Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie; Ermittlung von Verweilzeiten und Denitrifikation in der ungesättigten und gesättigten Zone; Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten, 2018.

[16] Jurgens, B. C. , J. K. Böhlke, L. J. Kauffman, K. Belitz, und B. K. Esser: A partial exponential lumped parameter model to evaluate groundwater age distributions and nitrate trends in long-screened wells. *Journal of Hydrology*, Bd. 543, S. 109–126, Dez. 2016, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.05.011.

[17] Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB): Landesbohrdatenbank, Online-Ressource https://lagb.sachsen-anhalt.de/service/geofachinformation/landesbohrdatenbank/, Zugriff am 09.06.2023.

[18] Van Stempvoort, D. R., J. W. Roy, S. J. Brown, und G. Bickerton: Artificial sweeteners as potential tracers in groundwater in urban environments. Journal of Hydrology, Bd. 401, Nr. 1–2, S. 126–133, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.02.013.

[19] Sültenfuß, J. und G. Massmann: Datierung mit der ^{3}He-Tritium-Methode am Beispiel der Uferfiltration im Oderbruch. Grundwasser, Vol.9, Nr.4, S. 221-234, 2004.

[20] Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB): Tektonische Übersichtskarte 1:400.000.

[21] GeoDienste GmbH im Auftrag des LHW: N2/Ar-Untersuchungen an Grundwassermessstellen in Sachsen-Anhalt – Endbericht zur Messkampagne 2021, Garbsen, 2021.

1 Einleitung

1.1 Veranlassung

Derzeit ist in Deutschland zu beobachten, dass trotz der ergriffenen Maßnahmen zur Verminderung der Nährstoffeinträge durch die Landwirtschaft nur geringe Verbesserungen im Grundwasser beobachtet werden können. Als eine der Ursachen hierfür wird angenommen, dass die Maßnahmen aufgrund der langen Verweilzeiten und Fließzeiten im Grundwasser noch nicht feststellbar sind. Zur Beurteilung dieser Zusammenhänge sollen im Zuge der aktuell geführten Diskussion zur Umsetzung der DüV das Alter von flachem Grundwasser mit teils erhöhten Nährstoffkonzentrationen ermittelt werden.

Die Björnsen Beratende Ingenieure Erfurt GmbH (BCE) wurde vom Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft (LHW) beauftragt mittels der Tritium/Helium-Datierungsmethode (T/He) eine Altersbestimmung für 24 Messstellen in Sachsen-Anhalt durchzuführen.

Diese Studie ist Fortsetzung der bisher erfolgten Untersuchungen aus den Jahren 2020 bis 2023 [3][4][5][6].

Mit dem Gesamtdatensatz soll fortlaufend eine Berechnung des Grundwasseralters basierend auf hydraulischen und hydrogeologischen Parametern erfolgen und mit den T/He-Altern verglichen werden.

2 Datengrundlage

Vom LHW wurden folgende Daten an BCE übergeben:

- Stammdaten zu den Messstellen: Koordinaten, Tiefenlagen, Ausbaudaten, geol. Einheit,
- Hydrochemische Analysen der Messstellen,
- Probenahmeprotokolle der bisherigen Beprobungen,
- Kartenwerke mit Anstrombahnen zu den Messstellen,
- Schichtverzeichnisse der Messstellen,
- Grundwasserhöhenraster aus dem Grundwasserkataster des LHW,
- Daten des Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO zur Grundwasserneubildung [11],
- Grundwasserhöhen, kf-Werte und Grundwasserneubildung für das Gebiet des Drömlings (aus Erweiterung der Modelle FEFLOW und WBalMo BRV Drömling (2019/2020) [12]),
- Studie zur N2/Ar-Untersuchungen an Grundwassermessstellen in Sachsen-Anhalt – Endbericht zur Messkampagne 2021 GeoDienste GmbH im Auftrag des LHW, 2021.

3 Grundwassermessstellen

3.1 Lage der Grundwassermessstellen

Die 24 Grundwassermessstellen (GWM) befinden sich nordwestlich der Colbitz-Letzlinger Heide und der Grenze zu Niedersachsen in den Grundwasserbilanzgebieten Bg7-Obere Ohre / Ilmenau und Bg4-Milde (Abbildung 1). Die Bilanzgebiete überschneiden sich mit den Grundwasserkörpern (GWK) MBA 1 – Altmärkische Moränenlandschaft (Milde) und OT 1 Ohre-Urstromtal (Obere Ohre).

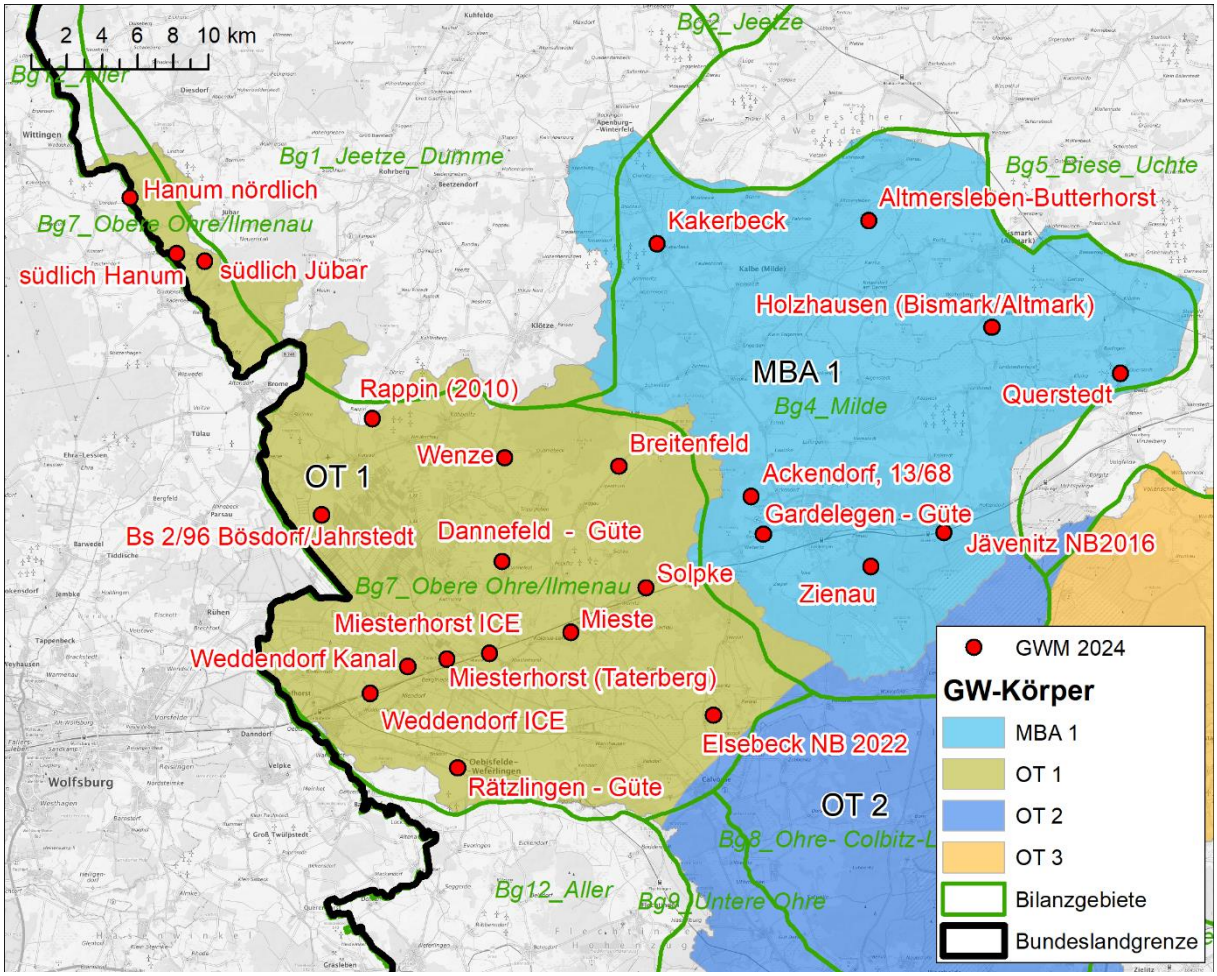

Abbildung 1: Lage der Grundwassermessstellen innerhalb der Grundwasserkörper und den Grundwasserbilanzgebieten.

Die GWM sind im oberen Porengrundwasserleiter verfiltert und umfassen die stratigraphischen Einheiten Pleistozänen Hochflächen (9 GWM, davon 7 GWM mit unbedecktem Grundwasserleiter) sowie Flussauen und Niederungen (14 GWM) und eine GWM in den Tertiären Schichten (Kakerbeck).

3.2 Beprobung der Grundwassermessstellen

Die Beprobung der Grundwassermessstellen wurde durch die Fa. LUS GmbH, Magdeburg durchgeführt und fand im Zeitraum vom 26.02.2024 bis 07.03.2024 statt. Die Beprobung richtete sich nach dem Merkblatt zur Grundwasserprobenahme des LHW [1]. Es wurde mit der Tauchpumpe MP1 bis zum Erreichen des hydraulischen und hydrochemischen Kriteriums gepumpt. Die Vorortparameter wurden während des Abpumpens kontinuierlich erfasst und protokolliert. Es wurden Grundwasserproben für folgende Analysen entnommen:

- Vorortparameter: Temperatur, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, gelöster Sauerstoff,
- Standardparameter: Anionen, Kationen, Eisen (Gesamt und gelöst), Mangan (Gesamt und gelöst), DOC, o-Phosphat,
- Tritium,
- Edelgaskonzentration.

Die Proben für die Standardparameter und Tritium wurden in entsprechende Flaschen gefüllt, während für die Analytik der Edelgaskonzentrationen eine spezielle Probenahmetechnik angewendet wurde. Hierbei wird das Grundwasser durch ein Kupferrohr geleitet und nach ausreichender Spülung

und Sicherstellung auf blasenfreies Wasser mit Klemmen verschlossen. Somit ist die Probe bis zur Analyse luftdicht verschlossen. Es wurden pro Messstelle zwei Kupferrohre befüllt, um eine Backup-Probe zu erhalten.

4 Methodik

4.1 Laboruntersuchungen

4.1.1 Vor-Ort- und Standardparameter

Die Analysen wurden durch die Fa. LUS GmbH durchgeführt. In der Anlage A-1 sind die Probenahme- und Analysenprotokolle aufgeführt. In Anlage A-2 sind die Ergebnisse der Analysen in tabellarischer Form aufgelistet.

4.1.2 Edelgase und Tritium

Die Analysen der Proben für Tritiumkonzentrationen erfolgten durch das Labor Isodetect GmbH, Leipzig. Die Edelgaskonzentrationen wurden durch die Firma Isotoptech Zrt. in Debrecen, Ungarn gemessen.

4.2 Hydraulische Altersbestimmung

Das Alter von Grundwasser an einem bestimmten Punkt im Grundwasserleiter setzt sich aus folgenden Zeitkompartimenten zusammen:

- die Sickerwasserzeit in der ungesättigten Zone von Geländeoberkante bis zum Grundwasser
- Fließzeit im gesättigten Grundwasserleiter
- direkter Eintrag von jungem Oberflächenwasser z. B. über Fließgewässer in das Grundwasser
- direkter Eintrag von älterem Grundwasser aus tieferen Grundwasserstockwerken.

Weiterhin ist der Messstellenausbau (Filterstrecke) sowie die Probenahmetiefe für das Grundwasseralter relevant.

Im Folgenden werden nur die Alter in der ungesättigten Zone und der Fließzeit im Grundwasserleiter bestimmt. Die direkten Einträge aus dem Oberflächenwasser oder tiefem Grundwasser können in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt werden. Diese Einträge sind allerdings potentielle Ursachen für die Abweichung zwischen hydraulischem Alter und dem durch die T/He-Methode berechneten Alter. Für alle Berechnungsmethoden werden vorab die Strombahnen und Fließlängen zu den GWM in GIS ermittelt (4.2.1). Die Sickerwasserzeit in der ungesättigten Zone wird nach der LAWA-Arbeitshilfe berechnet (Abschnitt 4.2.2). Für die Berechnung der hydraulischen Alter wird der Ansatz nach dem sog. Exponentialansatz nach [16] (Abschnitt 4.2.3) genutzt.

Der Darcy-Ansatz wird in dieser Studie nicht mehr angewendet, da sich hieraus in den vorangegangenen Studien sehr hohe Abweichungen zu den T/He-Altern ergaben [4][5].

Hinweis:
Für einen Vergleich zwischen hydraulischem Alter und dem durch die T/He-Methode bestimmten Alter ist nur die Fließzeit im Grundwasser geeignet. Erst nach vollständigem Luftabschluss, d. h. also ab dem Eintreten des Sickerwassers aus der ungesättigten Zone in die gesättigte Zone, findet kein Austausch mehr mit atmosphärischen Gasen statt und das Alter kann über den Zerfall von Tritium zu ^{3}He

berechnet werden. Das Alter in der ungesättigten Zone wird hier ausschließlich über die bodenhydrologischen Zusammenhänge ermittelt, eine isotopenhydrologische Bestimmung erfolgt nicht.

4.2.1 Ermittlung der Strombahnen

Auf Grundlage des Rasters der Grundwasserhöhen wird mittels des ArcGIS-Toolsets „Grundwasser“ [8] für jede Messstelle mit dem Werkzeug „Darcy-Geschwindigkeit“ ein Richtungs- und ein Geschwindigkeitsfeld der Grundwasserströmung berechnet (das Geschwindigkeitsfeld wird nur von den ArcGIS-Toolsets benötigt; es wird später nicht mehr benötigt). Anschließend wird das Werkzeug „Partikelverfolgung“ genutzt, um die Strombahn und hieraus die gesamte Fließlänge von der Messstelle zum höchsten Punkt des Grundwassereinzugsgebiets zu ermitteln.

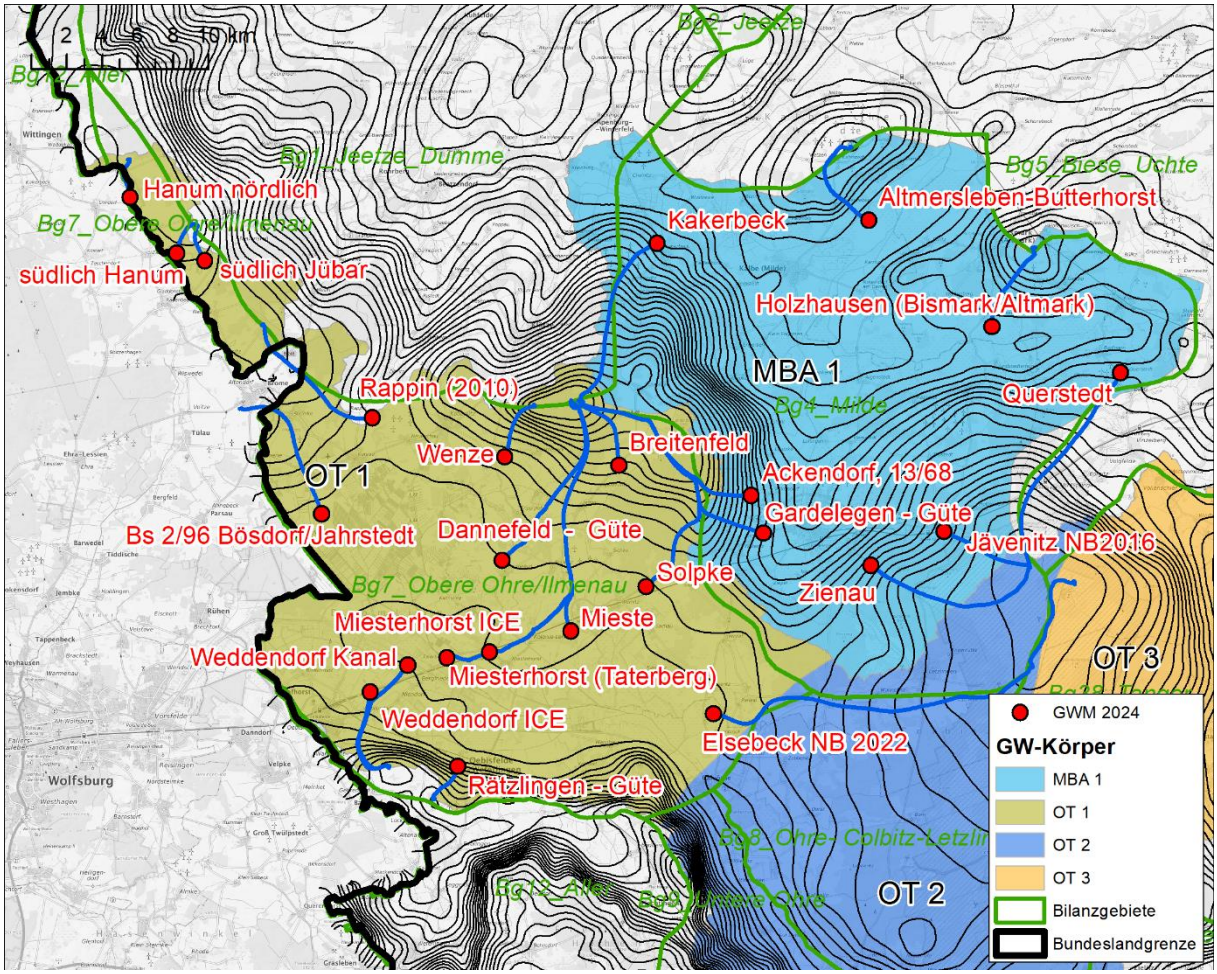

Abbildung 2: Strombahnen zu den GWM.

Die jeweiligen Strombahnen wurden in 100 m-Abschnitte unterteilt. Für jeden Abschnitt wurden folgende Flächendaten am Mittelpunkt der Polylinie abgegriffen:

- Grundwasserhöhe aus dem Grundwasserkataster des LHW,
- Im Grenzgebiet zu Niedersachsen: Gemessen Grundwasserhöhendaten aus dem Grundwassermodell für den Drömling [12],
- nutzbare Feldkapazität (nFK) [9],
- Grundwasserflurabstand (GfA) [9],
- hydraulische Leitfähigkeit (k_f-Wert) [9], [12], [12],
- Geländeoberkante (GOK) [10],

- Grundwasserneubildung (GWN) [11], [12], [12].

Die Strombahnen der GWM Rappin (2010) und Bs 2/96 Bösdorf liegen abschnittsweise im Bundesland Niedersachsen. Hier wurden die gemessen Grundwasserhöhendaten aus dem Grundwassermodell für den Drömling verwendet [12].

4.2.2 Sickerwasserzeit in der ungesättigten Zone

Die Sickerwasserzeit t_{UZ} in der ungesättigten Zone wurde für jeden Abschnitt entlang der Strombahnen berechnet: Es wird die Formel aus der LAWA-Arbeitshilfe [15] angewendet:

$$t_{UZ} = \frac{nFK \cdot d}{GWN} \qquad \text{Gl. 1}$$

mit:

t_{UZ}: Sickerwasserzeit in der ungesättigten Zone (UZ) [a]
nFK : nutzbare Feldkapazität [mm/dm]
GWN : Grundwasserneubildung [mm/a]
d : Schichtmächtigkeit ungesättigte Zone; Grundwasserflurabstand [dm]

Die Sickerwasserzeit kann sowohl abschnittsweise auf das Grundwasseralter aufaddiert werden, um dann anschließend das gesamte mittlere Alter inkl. Sickerwasserzeit und Grundwasserfließzeit zu erhalten (Darcy-Ansatz), oder auch als Mittelwert dem mittleren Grundwasseralter zugeschlagen werden (Exponential-Ansatz).

4.2.3 Exponential-Ansatz

Das mittlere Grundwasseralter ergibt sich aus theoretischen Gesetzmäßigkeiten zum Volumenstrom innerhalb eines Grundwasserleiters. Dabei wird angenommen, dass sich das durch die Grundwasserneubildung eingebrachte Wasser entlang von exponentiellen Fließbahnen durch den Grundwasserleiter bewegt (Abbildung 3). Hierzu werden folgende Annahmen getroffen: Der Grundwasserleiter ist ungespannt, homogen, mit gleichbleibender Mächtigkeit und gleicher Neubildungsrate.

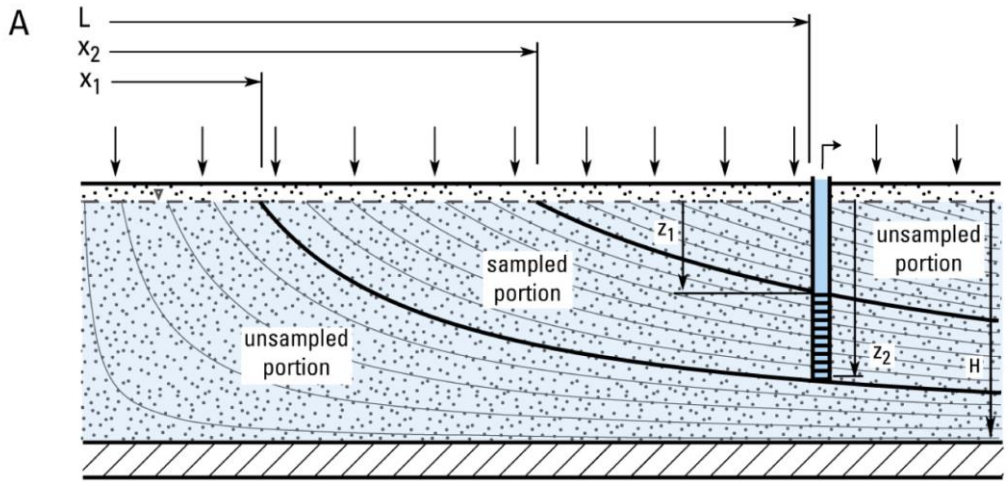

Abbildung 3: Querschnitt durch den Grundwasserleiter und Fließpfadkonzept nach dem Exponentialmodell (aus [16]).

Die grundlegende Formel für das mittlere Alter über die gesamte wassergesättigte Tiefe des Grundwasserleiters nach dem Exponentialmodell lautet:

$$t = \left(\frac{Hn}{R}\right) \qquad \text{Gl. 2}$$

mit:

t : Alter über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters [a]
R: Grundwasserneubildung [mm/a]
H : Gesättigte Grundwassermächtigkeit [m]
n: Porosität [-]

Das Grundwasseralter nimmt generell mit der Tiefe zu. Daher kann die Lage der Filterstrecke eine große Rolle spielen, weil meist nur ein Teil der gesamten Mächtigkeit des Grundwasserleiters beprobt wird. Aus dem Gesamtalter aus Gl. 2 kann das Alter des beprobten Horizonts über folgende Formel berechnet werden [16]:

$$t_{Filter} = t \cdot \left(\frac{H}{z_2 - z_1}\right) \cdot \left[\left(\frac{H-z_2}{H}\right) \cdot ln\left(\frac{H-z_2}{H}\right) - \left(\frac{H-z_2}{H}\right) - \left(\frac{H-z_1}{H}\right) \cdot ln\left(\frac{H-z_1}{H}\right) + \left(\frac{H-z_1}{H}\right)\right] \qquad \text{Gl. 3}$$

mit:

t_{Filter}: Alter für den Filterabschnitt [a]
t : Alter über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters [a]
H : Gesättigte Grundwassermächtigkeit [m]
z_1: Tiefe Filteroberkante unter Grundwasserstand [m]
z_2: Tiefe Filterunterkante unter Grundwasserstand [m]

Die Filtertiefen der Messstellen und die Mächtigkeit des Grundwasserleiters wurden aus den Schichtenverzeichnissen (SVZ) und den Ausbaudaten zu den Messstellen entnommen (Übergabe erfolgte durch das LHW). Falls die Schichtunterkante des Grundwasserleiters im Schichtenverzeichnis der Messstelle nicht verzeichnet ist, wurde diese aus dem Schichtenverzeichnis der nächstgelegenen Bohrung aus der Landesbohrdatenbank von Sachsen-Anhalt entnommen [17] (Übersicht der geometrischen Parameter in Tabelle 1).

In die Berechnung nach diesem Ansatz gehen Mittelwerte der Grundwasserneubildung entlang der Strombahn. Für die Porosität wird für alle Berechnungen ein Wert von 0,1 verwendet. Das Gesamtalter (ungesättigt und gesättigt) ergibt sich durch Addition des hier berechneten Grundwasseralters und der mittleren Sickerwasserzeit über die gesamte Strombahn.

Die LAWA-Arbeitshilfe [15] schlägt zur Ermittlung des hydraulischen Alters das sog. Teufe-Neubildungsverfahren vor. Dieses ist ähnlich zu dem hier vorgestellten Exponential-Ansatz, jedoch entspricht die gesättigte Grundwassermächtigkeit H im Teufe-Neubildungsverfahren der jeweiligen Filterober- und -unterkante (z_1 und z_2) unter Grundwasseroberfläche. Aus beiden Tiefenstrecken werden jeweils die hydraulischen Alter über Gl. 3 berechnet und hieraus das arithmetische Mittel gebildet.

Tabelle 1: Geometrischen Parameter der GWM zur Berechnung der hydraulischen Alter nach dem Exponential-Ansatz. Datenquelle der Bezugshöhen für die Aquifer-Unterkante (SVZ: Schichtenverzeichnis der Messstelle, sonst Bohrung-ID aus der Landesbohrdatenbank).

Lfd. Nr	MST. Nr	Messstelle	Filter-oberkante	Filterunterkante	Grundwasserstand	Aquifer-Basis	Datenquelle Aquifer-Basis
			m. NHN	m. NHN	m. NHN	m. NHN	
1	445096	Breitenfeld	55,68	53,68	68,58	31,88	3433/GL/171
2	341575	Bs 2/96 Bösdorf/Jahrstedt	55,82	54,82	57,78	52,82	3431/GL/26
3	440020	Dannefeld - Güte	53,13	49,13	58,78	48	3432/GL/86
4	445287	Elsebeck NB 2022	54,84	52,84	56,71	52,74	SVZ
5	445161	Hanum nördlich	67,13	65,13	77,39	62,13	3231/GL/254
6	445137	Mieste	50,97	48,97	57,06	47,97	SVZ
7	445149	Miesterhorst (Taterberg)	51,42	49,42	56,21	49,22	SVZ
8	445015	Miesterhorst ICE	50,51	47,51	56,69	45,16	3532/GL/262
9	445171	Rappin (2010)	57,99	55,99	59,45	54,99	SVZ
10	440031	Rätzlingen - Güte	29,59	25,59	58,83	25,49	SVZ
11	440002	Solpke	55,93	51,93	57,63	49,1	3522/GL/192
12	445162	südlich Hanum	74,08	73,08	75,99	73,07	SVZ
13	445163	südlich Jübar	64,66	62,66	73,41	62,56	SVZ
14	445016	Weddendorf ICE	53,62	50,62	58,13	50,52	SVZ
15	445049	Weddendorf Kanal	54,2	50,2	56,73	47,8	3532/GL/83
16	445098	Wenze	44,8	42,8	63,25	39,4	3432/GL/64
17	445024	Ackendorf, 13/68	29,66	26,66	49,98	18,3	SVZ
18	445022	Altmersleben-Butterhorst	26,31	24,31	29,03	17,66	3334/GL/84
19	440003	Gardelegen - Güte	34,85	30,85	47,03	30,75	SVZ
20	445154	Holzhausen (Bismark/Altmark)	23,31	21,31	33,86	20,31	SVZ
21	445249	Jävenitz NB2016	55,9	53,9	61,61	42,9	3435/GL/205
22	445134	Kakerbeck	16,05	14,05	36,93	13,55	333/GL/148

Lfd. Nr	MST. Nr	Messstelle	Filter-ober-kante	Filterun-terkante	Grund-wasser-stand	Aquifer-Basis	Datenquelle Aquifer-Basis
			m. NHN	m. NHN	m. NHN	m. NHN	
23	445135	Querstedt	26,56	24,56	43,74	24,46	SVZ
24	445025	Zienau	54,1	52,1	57,01	52	3434/GL/425

4.3 Altersbestimmung durch die Tritium-Helium-Methode

Durch den Zerfall von Tritium (^3H) wird als Zerfallsprodukt tritiogenes Helium (^3He) gebildet, welches sich im Grundwasser anreichert, da es ein stabiles Isotop ist [18]. Es eignet sich daher zur Bestimmung der mittleren Verweilzeiten von Grundwässern. Die Altersdatierung kann rechnerisch über eine Massenbilanzierung von Tritium und ^3He erfolgen, wobei jedoch zusätzliche Einträge von Helium berücksichtigt werden müssen [19]. Die gemessene ^3He-Konzentration setzt sich zusammen aus Anteilen der Atmosphäre, dem Erdmantel, einer sog. „excess-air“-Komponente und dem Zerfall aus Tritium. Als „excess air" wird die Übersättigung an gelösten Gasen im Grundwasser bezeichnet. Sie wird vorwiegend durch Wechselwirkungen zwischen Bodenluft und Wasser nahe des Grundwasserspiegels hervorgerufen. Kleine Luftblasen, die in Bodenporen gefangen sind, werden bei Schwankungen des Grundwasserspiegels im Grundwasser eingeschlossen. Der hierbei erzeugte hydrostatische Überdruck erzwingt einen Gasaustausch, der zu einem Überschuss von gelösten Gasen führen kann. Zur Quantifizierung der Helium-Komponente über „excess-air“ dient der Neongehalt des Grundwassers, der als konservativer Tracer von Zerfallsprozessen unbeeinflusst ist. Die Quantifizierung des durch den Zerfall gebildeten ^3He kann anhand bekannter Tracer- und Temperaturverhältnisse berechnet werden. Der Eintrag aus dem Erdmantel kann über das Verhältnis von ^4He und ^3He bestimmt werden. Weiterhin können aus den ^3He-/ ^4He-Isotopenverhältnissen die Anteile von jungem und altem Grundwasser bestimmt werden, da sich ^4He aus dem Erdmantel stammend umso mehr anreichert, je älter das Wasser ist. Details zur Methodik der T-He-Altersbestimmung und der Ergebnisinterpretation sind im Teilbericht T-1 zu finden.

5 Ergebnisse

5.1 Hydrochemische Charakterisierung

5.1.1 Vor-Ort-Parameter

Die Temperaturen liegen für die beprobten GWM zwischen 8,4 und 11,8 °C (Abbildung 4). Der pH-Wert liegt bei den meisten GWM unter pH = 7. Auffallend sind die sehr niedrigen pH-Werte in den GWM Jävenitz (pH = 5,3) und Rappin (2010) (pH = 5,0). Das Redox-Potential liegt zwischen + 118 mV und -18 mV, was auf leicht reduzierende Bedingungen von Nitrat, Mangan, Eisen und auch Sulfat hinweist. Die gelöste Sauerstoffkonzentration liegt in dem Großteil der GWM bei unter 0,1 mg/l. Dies weist auf eine hohe aerobe mikrobiologische Aktivität hin. Unter dieser niedrigen Sauerstoffkonzentration setzt auch die anaerobe Denitrifikation ein, die durch die Oxidation von Kohlenstoff oder Eisensulfiden Nitrat reduziert. In GWM Rappin (2010) und Hanum-südlich werden Sauerstoffkonzentrationen über 1 mg/l erreicht.

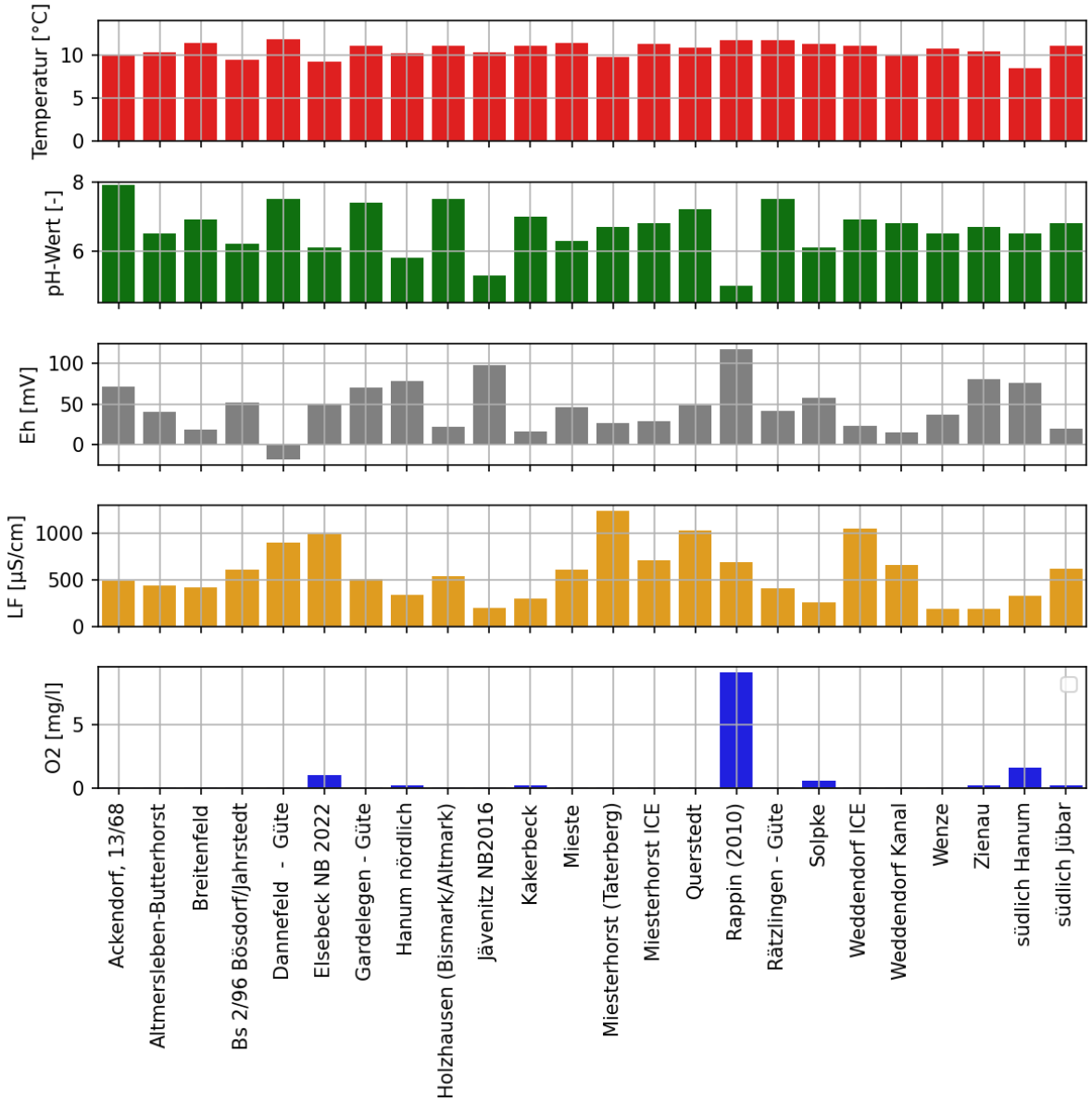

Abbildung 4: Vor-Ort-Parameter während der Beprobung der GWM.

5.1.2 Hauptionen

Das Grundwasser kann auf Grundlage der Ionenkonzentrationen generell als erdalkalisches, überwiegend sulfatisches teils hydrogenkarbonatisch-sulfatisches Wasser charakterisiert werden (sieben GWM aus dem Grundwasserkörper OT 1, fünf GWM aus dem Grundwasserkörper MBA 1). Liegen höhere Konzentrationen an Natrium und Kalium vor, ist das Grundwasser als erdalkalisch-alkalisches sulfatisch bzw. karbonatisch Wasser einzuordnen (z. B. Miesterhorst, Weddendorf Kanal).

Calcium ist bis auf die Proben aus GWM Weddendorf Kanal (hier: Natrium) das dominierende Kation, während HCO_3^- oder SO_4^{2-} das dominierende Anion ist (Abbildung 5).
Eine Ausnahme bildet hier Rappin (2010), wo Nitrat den höchsten Anteil der Anionen bildet. Insgesamt sind die Anteile von Nitrat am Gesamtionenäquivalent sehr niedrig, was auf die niedrigen Nitratkonzentrationen, meist unter der Bestimmungsgrenze zurückzuführen ist. Ausnahmen bilden hier die bereits erwähnt GWM Rappin (2010), Südlich Jubar und Altmersleben-Butterhorst und Elsebeck NB 2022.
In den GWM Miesterhorst (Taterberg), Querstedt und Elsebecke NB 2022 ist der Chlorid-Anteil erhöht. In GWM Altmersleben-Butterhorst, Elsebecke und Rappin (2010) sind die Kalium-Konzentrationen stark erhöht. Erhöhte Kalium und Chlorid-Konzentrationen können auf einen Eintrag von Abwässern oder Gülle hinweisen.
Die hydrochemischen Analysen der Grundwasserproben sind in Anlage A-2 zusammengestellt.

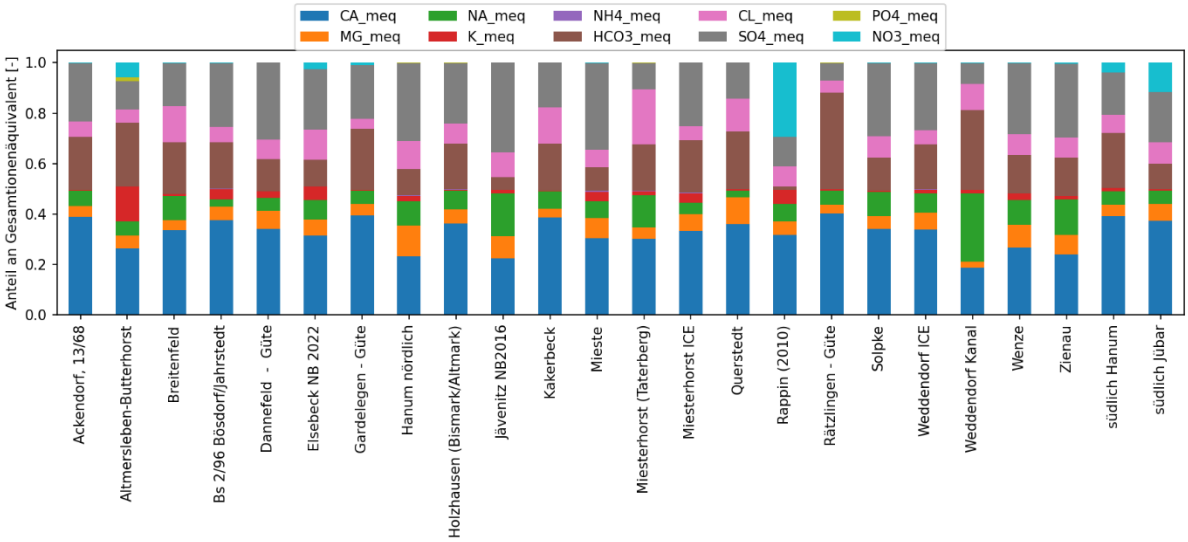

Abbildung 5: Anteil der Ionen am Gesamtionenäquivalent.

5.2 Hydraulische Alter

In Abbildung 7 werden die berechneten hydraulischen Grundwasseralter in der gesättigten Zone sowie die Gesamtzeit (ungesättigt + gesättigt) zu den GWM dargestellt. Hierfür wurden die folgenden Datengrundlagen genutzt:

- Sickerwasserzeitberechnung:
  - GW-Neubildung ArcEGMO
  - nutzbare Feldkapazität
  - Grundwasserflurabstand
- Exponential-Ansatz:

- GW-Neubildung ArcEGMO
- Filtertiefen
- Porosität: 0,1
- Aquiferdaten (Aquiferbasis, Grundwasserstände)

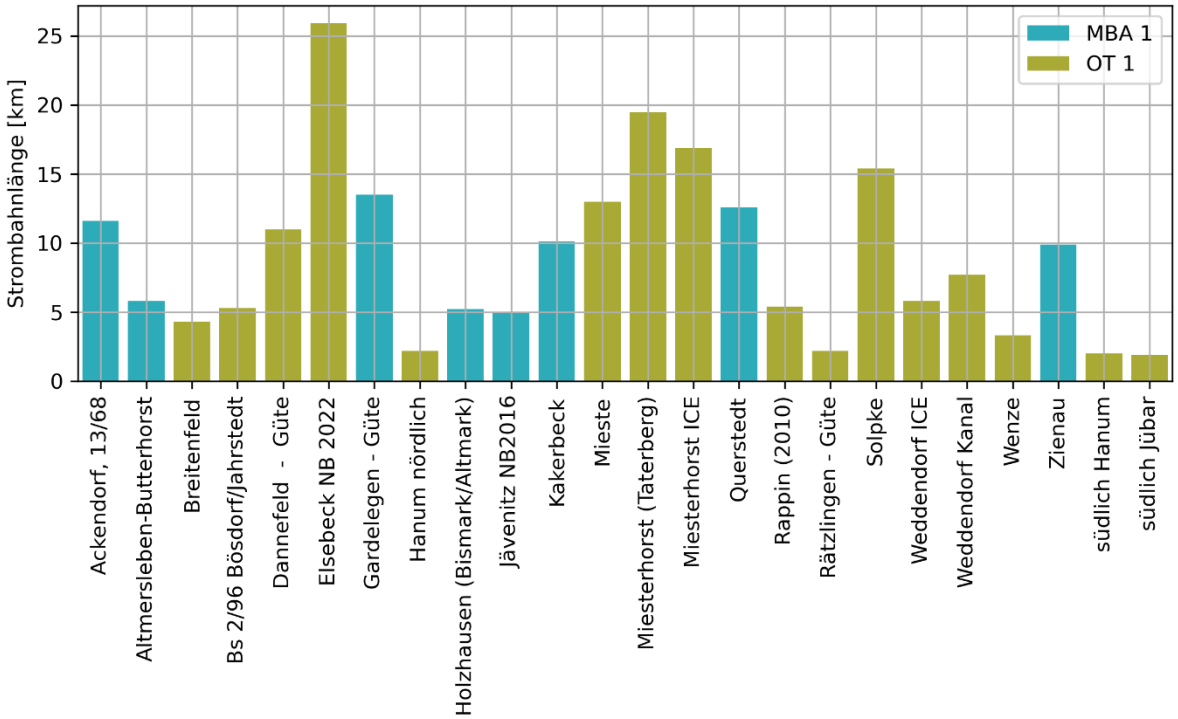

Abbildung 6: Strombahnlängen für den Datensatz 2024

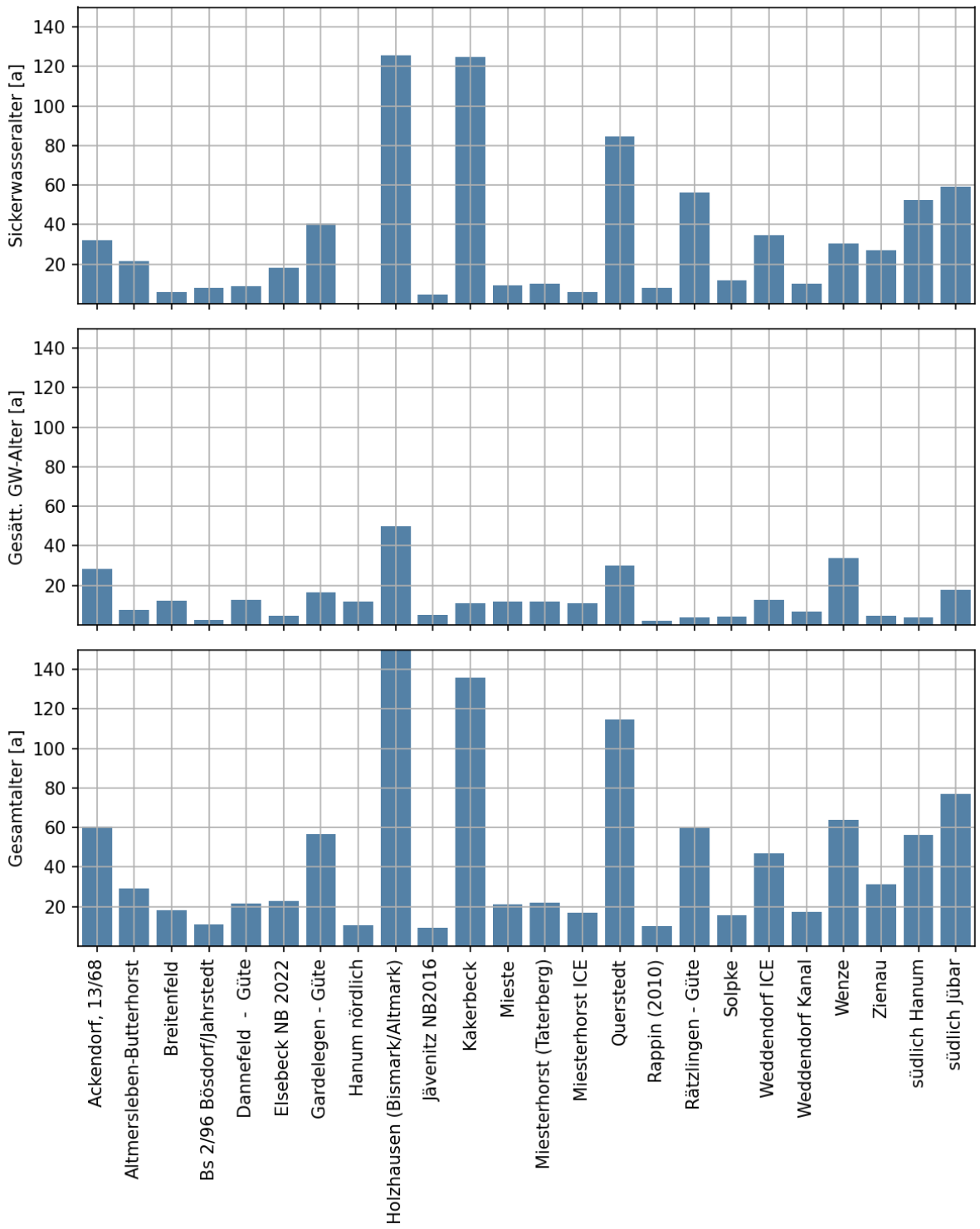

Abbildung 7: Sickerwasseralter in der ungesättigten Zone unter Verwendung der ArcEGMO-Grundwasserneubildungsraten (oben), hydraulisches GW-Alter in der gesättigten Zone (Mitte) nach der Exponential-Methode, Filtertiefe wird berücksichtigt. Unten: Gesamtalter des Grundwassers.

5.3 T/He-Altersdatierung

In 22 von 24 untersuchten Grundwasserproben wurde sowohl rezentes Tritium (^3H) als auch tritiogenes Helium (^3He) analysiert, wodurch eine Altersdatierung möglich ist (Abbildung 8).

Das fehlende rezente Tritium bei den beiden GWM Rätzlingen und Kakerbeck weist auf fast ausschließlich altes, vormodernes Grundwasser in dieser Probe hin. Bei einem hohen Verhältnis zwischen tritiogenem Helium und Tritium (viel tritiogenes Helium und/oder relativ niedriger Tritiumgehalt) liegt vermutlich eine hauptsächliche Grundwasserneubildung zwischen 1960 und 1980 vor. Dies könnte bei den sieben GWM Dannefeld-Güte*, Weddendorf Kanal, Breitenfeld, Kakerbeck, Mieste, Holzhausen und Rappin (2010) der Fall sein.
Grundsätzlich deutet ein kleines Verhältnis zwischen tritiogenem Helium und Tritium auf ein Grundwasseralter =< 40 Jahre hin. Dies dürfte bei den restlichen 17 GWM der Fall sein.
Überwiegend war in den Proben der größte Teil des ursprünglich eingetragenen Tritiums bereits zerfallen, wobei das ermittelte tritiogene Helium ein Vielfaches des direkt messbaren Gehalts erreichte.
Bei den fünf GWM Rätzlingen-Güte, Kakerbeck, südlich Hanum, Rappin und Elsebeck NB2022 enthielten die Proben niedrige Gehalte an tritiogenem Helium (graue Balken in Abbildung 8), was entweder auf besonders junges oder auf besonders altes Grundwasser verweist.

Die mittleren Alter in den Grundwasserproben decken ein Altersspektrum zwischen 3 und 90 Jahren ab (Abbildung 9), wobei in der Probe Kakerbeck das höchste Alter mit 90 Jahren berechnet wurde.
In sechs MST ist das mittlere Alter jünger als 20 Jahre. Grundwasser jünger als 10 Jahre (hohe Tritium- und relativ dazu niedrige tritiogene Helium Konzentrationen) ist in den GWM Genthin, Mützel-Güte, und Räckendorf anzutreffen. Bis auf die Grundwassermessstelle Räckendorf NB 2016 ist bei allen Grundwassermessstellen eine Zumischung von vormodernem Grundwasser anzunehmen. Der Anteil an jungem Grundwasser (jünger als 75 Jahre) ist in zwölf Proben höher als 50 %.

Die vier GWM Bösdorf/Jahrstedt*, Dannefeld-Güte*, Mieste und Elsebeck NB2022 weisen allerdings höhere Gasverluste auf und haben deshalb prinzipiell eine sehr hohe Datierungsunsicherheit.

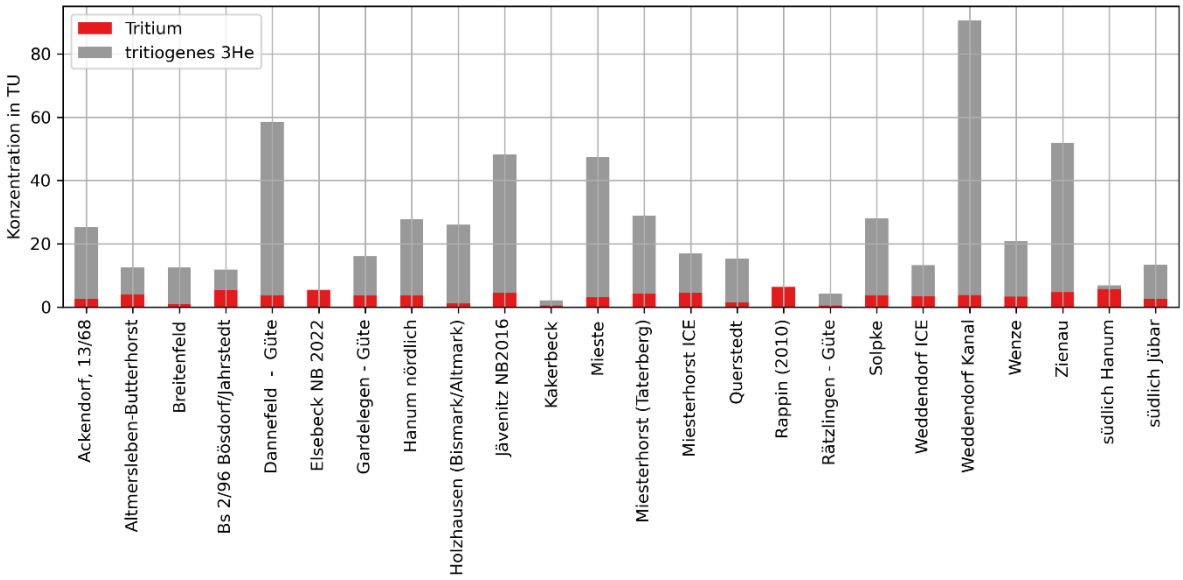

Abbildung 8: Tritium und durch dessen Zerfall gebildetes tritiogenes Helium.

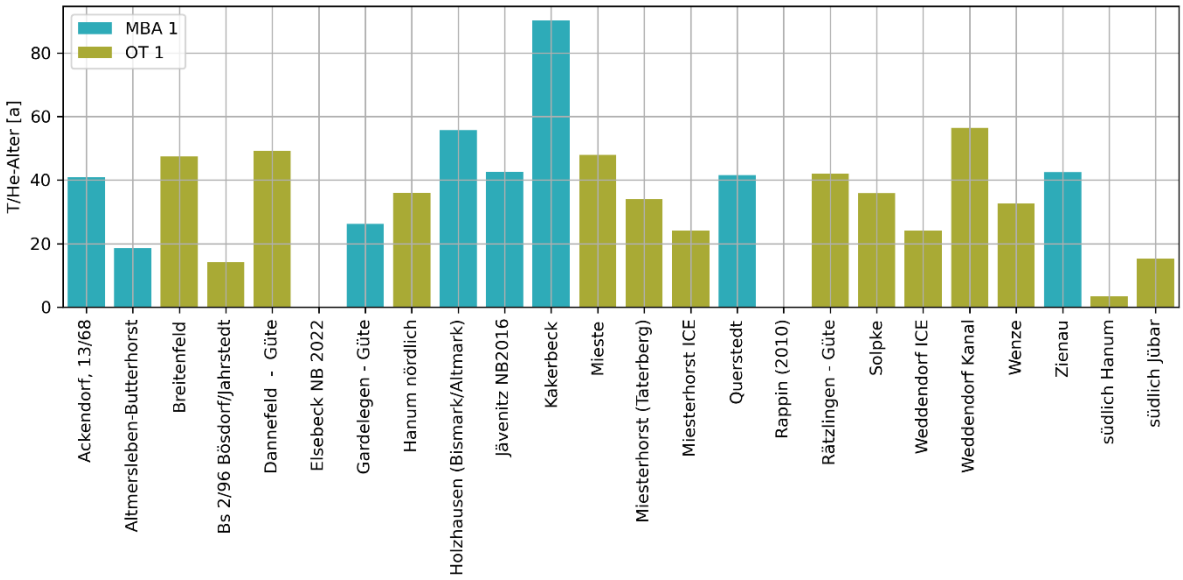

Abbildung 9: Mittleres Grundwasseralter nach der T/He-Methode für den Datensatz 2024.

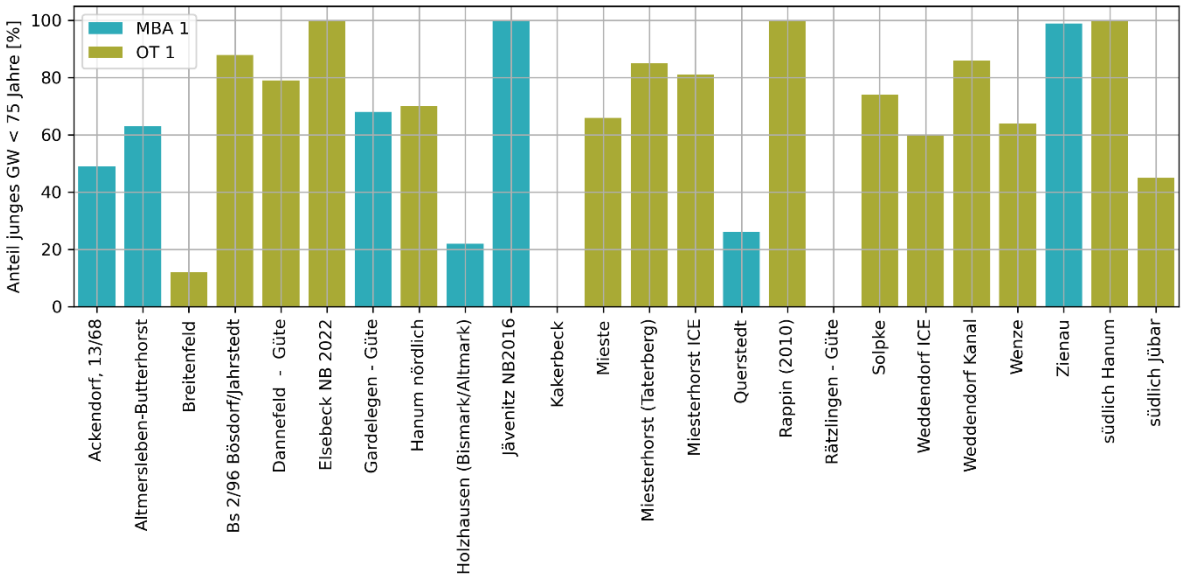

Abbildung 10: Anteile von jungem Grundwasser (< 75 Jahre)

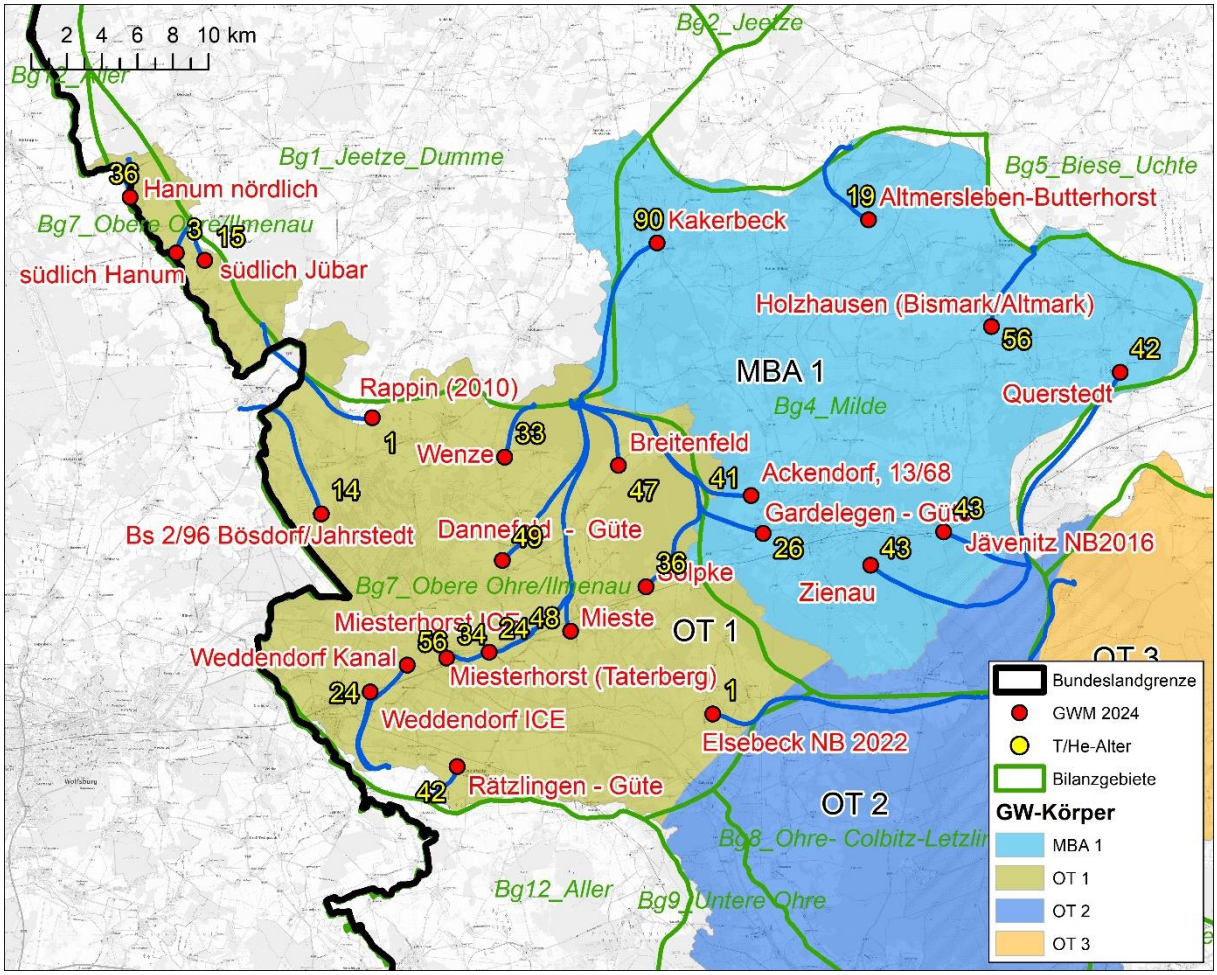

Abbildung 11: Räumliche Darstellung der T/He-Alter für die GWK MBA 1 und OT 1 sowie den Strombahnen zu den GWM.

Im räumlichen Vergleich sind im OT 1 generell jünger Alter anzutreffen als im nordöstlich gelegenen MBA 1 (Abbildung 11), was wahrscheinlich insbesondere auf die tiefere Verfilterung der MST in MBA 1 zurückzuführen ist. Auch ist in MBA 1 die Grundwasserneubildung etwas geringer, was zu älterem Grundwasseralte führt.

Aus den Verhältnissen der einzelnen Heliumkomponenten sowie der Neonkonzentrationen kann auf die Helium-Einträge in das Grundwasser geschlossen werden. In Abbildung 2 ist der Datenpunkt für frisches Grundwasser, das unter Standardbedingungen im Lösungsgleichgewicht mit der Atmosphäre steht, hellblau hervorgehoben (Ne/He = 4,34; $^3He/^4He$ = 1,38*10-6). Ein geringeres Ne/He-Verhältnis und zugleich ein geringeres $^3He/^4He$-Verhältnis indizieren den Eintrag von radiogenem Helium, das hauptsächlich aus ^4He besteht (grün eingefärbtes Rechteck) und in sehr altem Grundwasser vorkommt. Ein zunehmendes $^3He/^4He$-Verhältnis weist dagegen auf die Bildung von tritiogenem ^3He hin, was die Altersbestimmung über die T/He-Methode ermöglicht. Durch einen Heliumeintrag aus *excess air* kann ein Messpunkt nach links verschoben werden, da der Heliumeintrag stärker ist als derjenige von Neon.

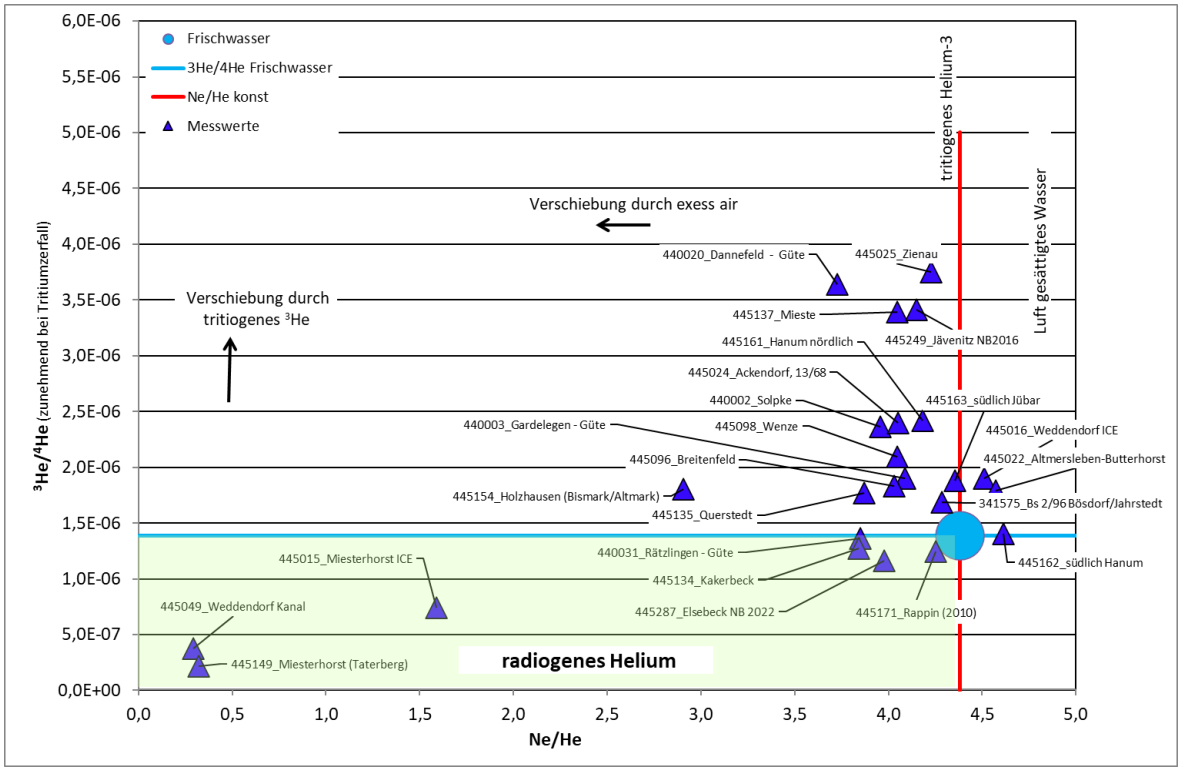

Abbildung 12: Diagramm zur Veranschaulichung dominanter He-Einträge in den untersuchten Messstellen: Ne/He-Konzentrationsverhältnisse vs. $^3He/^4He$-Verhältnisse in Bezug zu frischem, luftgesättigtem Grundwasser (hellblauer Kreis). Aus T-1.

Höhere Anteile von tritiogenem Helium (> 50 % des gesamten ^3He-Gehalts) finden sich in den fünf GWM Dannefeld-Güte* (67,9%), Zienau (64,9%), Weddendorf Kanal (70,45%), Mieste (63,15%) und Jävenitz NB2016 (61,9%), was auf Grundwasser aus den 1970er bis 1980er Jahren hindeutet.
Alle weiteren GWM weisen eine große Ähnlichkeit mit neu gebildetem, sehr jungem Grundwasser auf, da sich deren Messpunkte in der Abbildung 2 auf bzw. in der Nähe der $^3He/^4He$-Frischwasserlinie befinden.

6 Gesamtdatensatz

Der Gesamtdatensatz umfasst insgesamt 113 GWM aus Probenahmen der Jahre 2020 (GEO-data / Fugro [3]), 2021 (BCE, [4]), 2022 [5], 2023 [6] und 2024 (Abschnitt 5, dieser Studie).
Die GWM befinden sich in den folgenden Grundwasserkörpern (Abbildung 13):

- 2020 (GEO-data / FUGRO): SAL GW 020, SAL GW 022, SAL GW 023, SAL GW 041, VM 2-1
- 2021 (BCE): OT2, OT3
- 2022 (BCE): EN1, EN2
- 2023 (BCE): HAV_UH_6, HAV_UH_7
- 2024 (BCE). MPA 1, OT 1

Die Daten der GWM in den räumlich eng zusammenliegenden Grundwasserkörpern SAL GW 020, -022, -023 und VM 2-1 werden zu einem Datensatz „SAL GW 02x“ zusammengefasst.

Das Ziel der Auswertung des Gesamtdatensatzes ist es, Zusammenhänge zwischen dem analytischen T/He-Alter, hydrogeologischen und messstellenspezifischen Parametern darzustellen. Der Gesamtdatensatz ist im Anhang A-3 zusammengestellt.

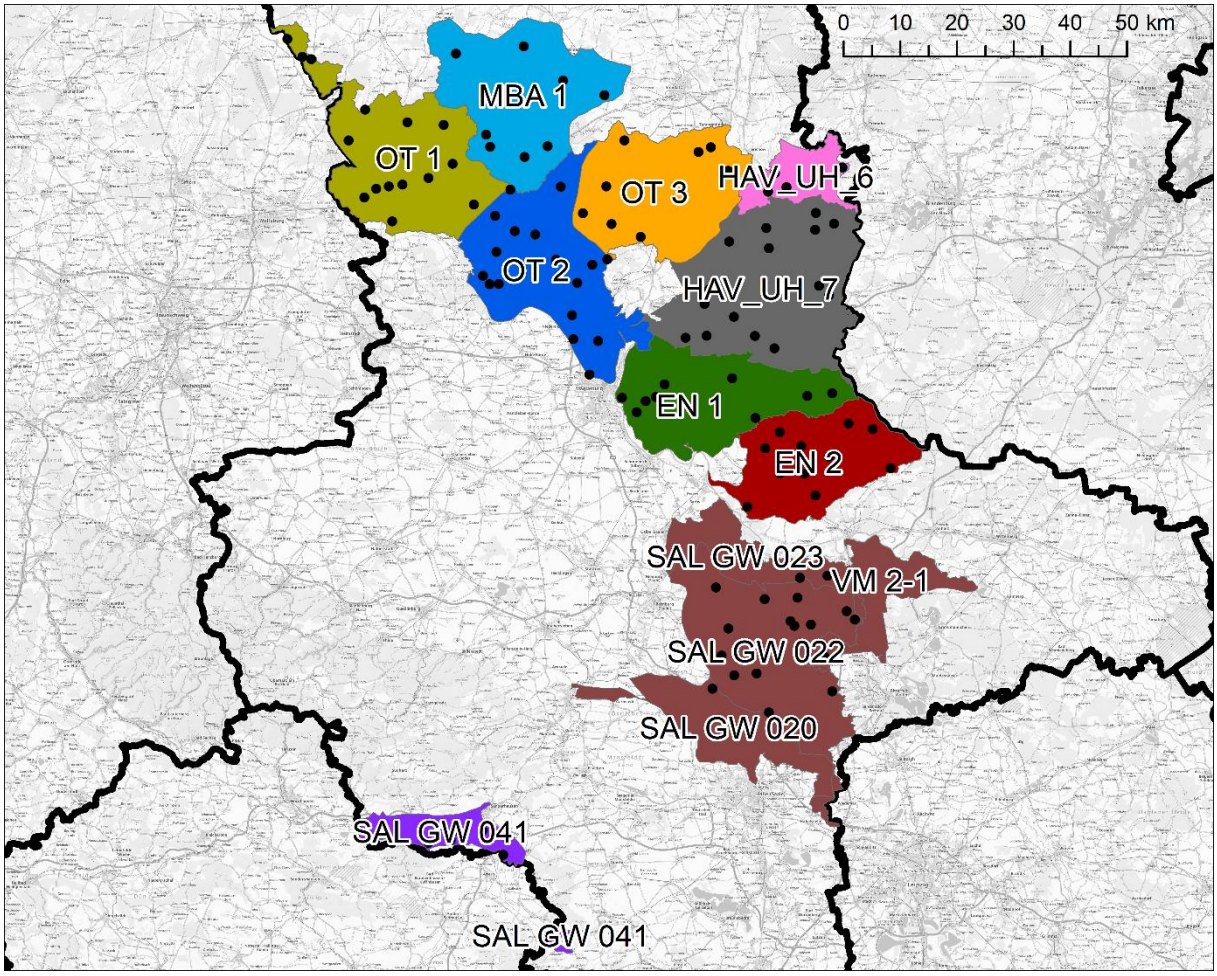

Abbildung 13: Übersicht über den Gesamtdatensatz innerhalb der Grundwasserkörper

6.1 T/He – Alter und hydrogeologische Parameter im Bezugsraum GWK

Das Grundwasseralter wird von hydrogeologischen Gegebenheiten sowie messstellenspezifischen Parametern beeinflusst. Daher werden in einem ersten Schritt die Parameter in Bezug auf deren Größe und Variationsbreite innerhalb der GWK dargestellt (Abbildung 16). Das Augenmerk liegt hierbei vielmehr auf generellen Zusammenhängen anstatt auf Aussagen zu einzelnen GWM.

Generell stehen **Grundwasserflurabstand**, die **Filterunterkante** sowie die **Strombahnlänge** in einem positiven Zusammenhang. D. h. je höher der Grundwasserflurabstand, desto höher ist die Filterunterkante und desto länger ist die Strombahnlänge (Abbildung 16, oberste Reihe). So sind insbesondere für OT2, EN2, MBA1 und HAV_UH_7 diese Parameter am höchsten, wobei auch deren Streubreite am größten ist. Demgegenüber sind in den GWK OT1, SAL GW 41, SAL GW 02x und HAV UH 6 diese Parameter am niedrigsten und auch die Streubreite am geringsten.

Die **mittlere Grundwasserneubildung** entlang der Strombahnen (ArcEGMO-Datensatz) ist in den nördlichsten GWK OT1, OT2, OT3 und HAV_UH_7 am höchsten und im zentral gelegenen EN 1 am niedrigsten. Ein positiver Zusammenhang zur Strombahnlänge ist erkennbar, was vermutlich auf die höher gelegenen Grundwasserneubildungsgebiete (und somit höheren Niederschläge) zurückzuführen ist, von wo aus längere Strombahnen ausgehen.

Die **k_f-Werte** (BGR-Datensatz) streuen gering in den Bereichen zwischen $1 \cdot 10^{-3}$ m/s und $1 \cdot 10^{-4}$ m/s. Ein offensichtlicher Zusammenhang der k_f-Werte mit den bisher beschriebenen Parametern ist nicht erkennbar.

Die **T/He-Alter** sind in den nördlichen und zentral gelegenen GWK am höchsten (Abbildung 14, Abbildung 15). Die jüngsten Grundwasseralter treten in SAL GW 041 und SAL GW 02x auf. Der GWK HAV UH 7 bildet aus Sicht der Grundwasseralter den Übergang zwischen dem nördlichen alten Grundwasser und dem südlichen jungen Grundwasser. Ein leichter positiver Zusammenhang zwischen den oben beschriebenen Parametern - ausgenommen dem k_f-Wert- ist zu erkennen.

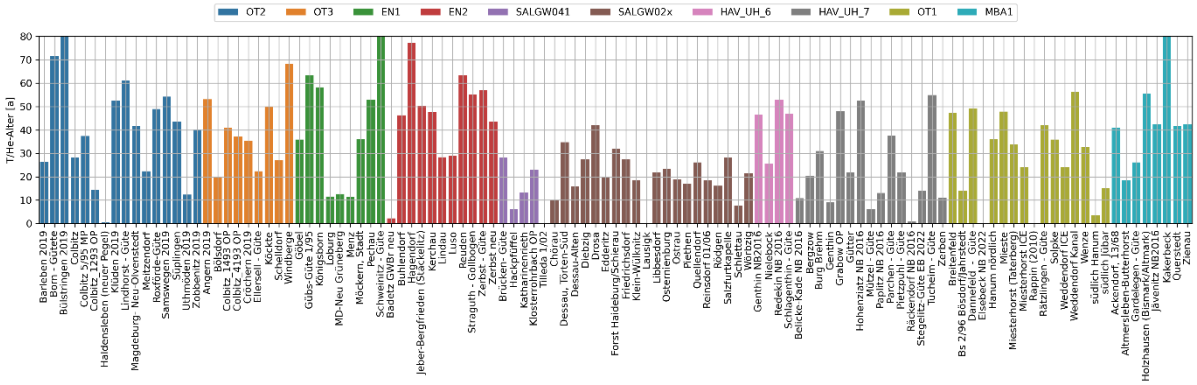

Abbildung 14: T/He-Alter für den Gesamtdatensatz

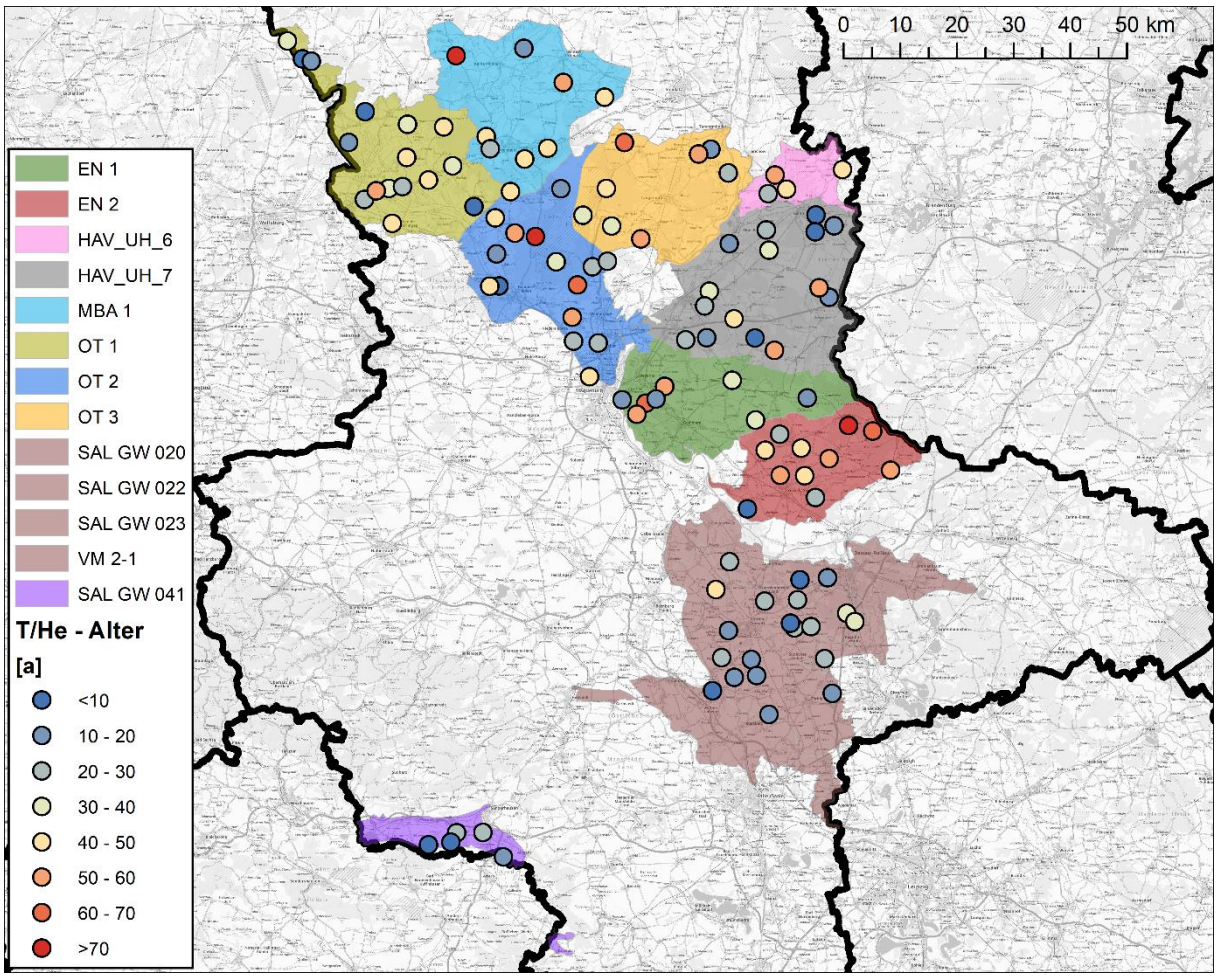

Abbildung 15: Räumliche Verteilung der T/He-Alter innerhalb der Grundwasserkörper

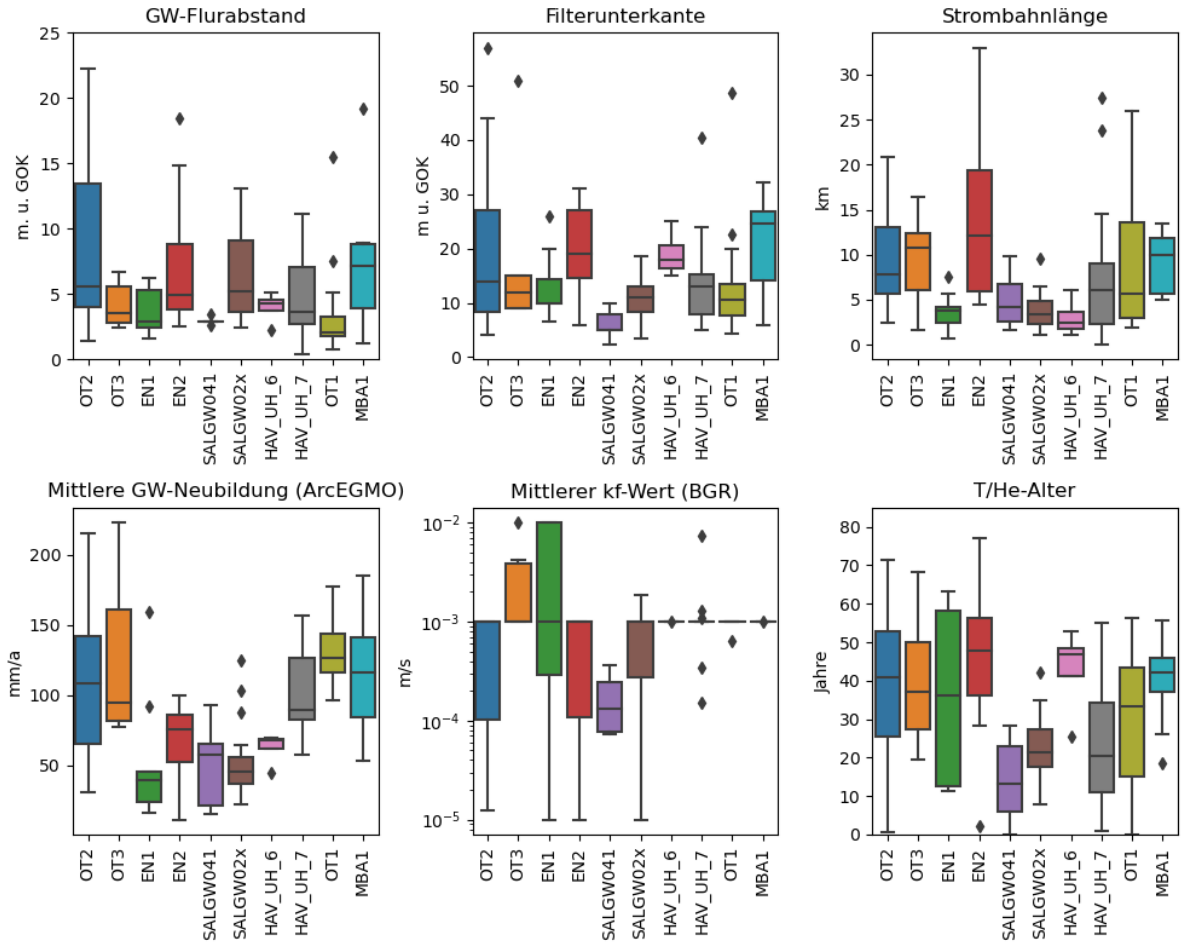

Abbildung 16: Boxplots zu Parametern, die das Grundwasseralter in einer Grundwassermessstelle beeinflussen, sowie das T/He-Alter (unten rechts).

6.2 Vergleich T/He-Alter und hydraulische Alter

Die hydraulischen Alter umfassen im Vergleich zum analytischen T/He-Alter mehrere Größenordnungen. Die hydraulischen Alter des Exponential-Ansatzes streuen von 0,1 bis 200 Jahren (Abbildung 17, links). Es ist ein schwacher positiver linearer Zusammenhang zum T/He-Alter erkennbar (T/He-Alter > 75 Jahre nicht berücksichtigt). Die mittlere absolute Abweichung (MAE) beträgt 20,9 Jahre, R^2=0,005 und die Nash-Sutcliff efficiency (NSE) = - 1,6.

Die Abweichung zwischen hydraulischem Alter und dem T/He-Alter wird am stärksten in den GWK OT 2, OT 3 und MBA 1 unterschätzt (Abbildung 17, rechts). Am besten wird das hydraulische Alter in den GWK EN1, SAL GW 041 und HAV UH 6 wiedergegeben. Wie schon in der Studie BCE (2022) [5] beschrieben steigen die Abweichungen (Unterschätzungen des Alters) je höher die Grundwasserneubildung entlang der Strombahn ist. Die Grundwasserneubildung geht umgekehrt proportional in die hydraulische Berechnung nach dem Exponentialmodell bzw. dem Teufe-Neubildungsverfahren ein.

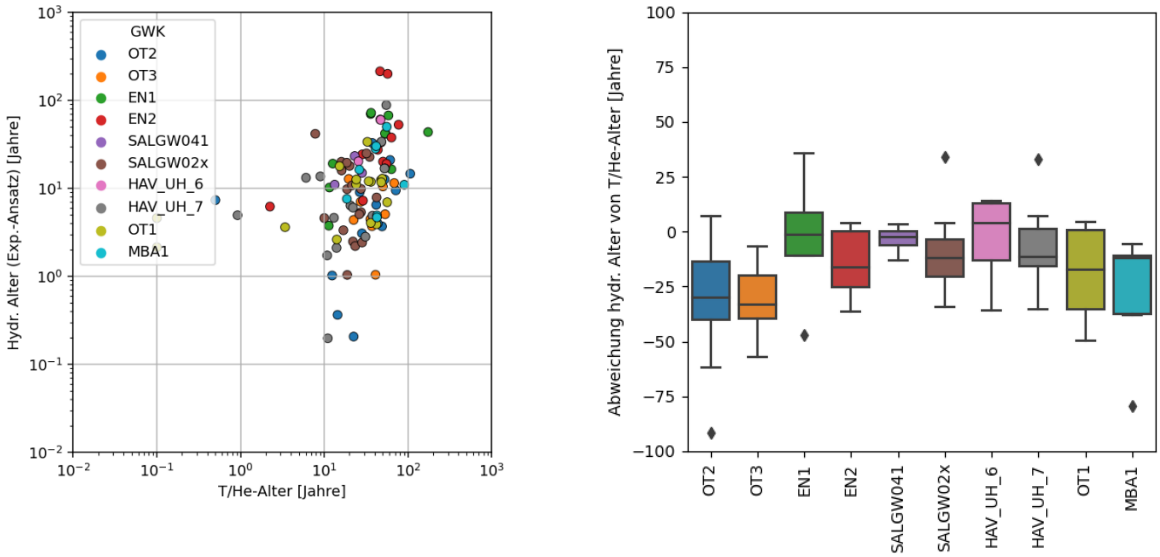

Abbildung 17: Vergleich zwischen T/He-Alter und hydraulischem Alter mit Exponential-Ansatz.

6.3 Korrekturansatz Grundwasserneubildung

In der Studie aus dem Jahr 2022 wurde auf den Datensätzen von 2020, 2021, 2022 ein Korrekturansatz auf Basis der Grundwasserneubildung genutzt, um die hydraulischen Alter besser an die T/He-Alter anzupassen. Es zeigt sich: Je höher die Grundwasserneubildung, desto mehr wird das hydraulische Alter unterschätzt, was zu stärker negativen Residuen führt. Durch eine Regressionsanalyse über die GWN (x) und die Residuen (y) lässt sich eine Logarithmus-Funktion anpassen (Abbildung 18, gestrichelte Linie). Daten mit T/He-Alter oder hydraulischem Alter über 75 Jahren werden nicht in die Regressionsanalyse miteinbezogen. Die Funktion zur Korrektur des hydraulischen Alter wird mit den Daten von 2023 und 2024 aktualisiert (Gl. 5).

$$t_{Korr} = 9{,}9 \cdot \ln(GWN) - 27{,}5 \qquad \text{Gl. 5}$$

Angewendet auf den gesamten Datensatz bis einschließlich 2024 beträgt die mittlere Abweichung zwischen T/He-Alter und hydraulischem Alter MAE = 14,1 Jahre, R^2 = 0,20, NSE = - 0,07.
Dies zeigt, dass insgesamt die Güte der hydraulischen Altersbestimmung verbessert wird (Abbildung 19, Mitte).
Es ist zu beachten, dass mit diesem Ansatz faktisch auch weitere Einflussfaktoren (Porosität, Filtertiefe, Aquifermächtigkeit) mitkorrigiert werden. Im Folgenden wird daher der hier gezeigte Ansatz mit einem Korrekturansatz zur Porosität kombiniert.

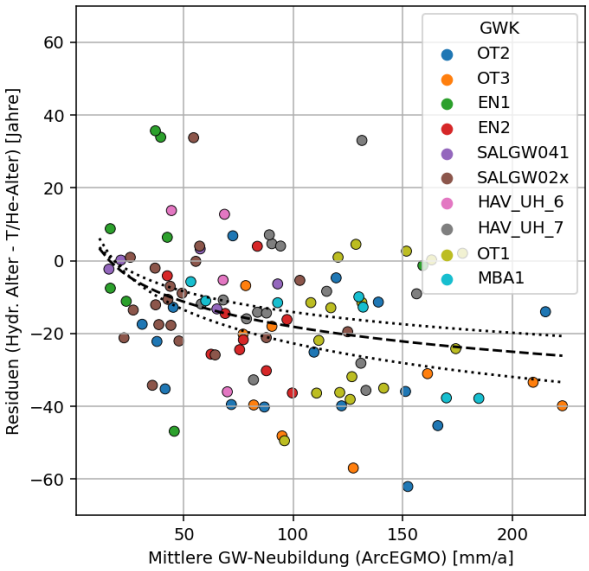

Abbildung 18: Zusammenhang zwischen Mittlerer Grundwasserneubildung aus dem ArcEGMO Datensatz und Alters-Residuen (Differenzen zwischen hydraulischem Alter und T/He-Alter) mit logarithmischer Regression (gestrichelt: Datensatz bis einschl. 2024, gepunktet: Datensätze einschl. 2023 bzw. einschl. 2022).

6.4 Korrekturansatz Porosität und Grundwasserneubildung

Die Porosität geht linear in die Berechnung des hydraulischen Alters ein (siehe Abschnitt 4.2.3, Gl. 2). D. h. eine Verdopplung der Porosität bewirkt eine Verdopplung des Grundwasseralters. In der bisherigen Berechnung der hydraulischen Alter wird eine konstante Porosität von 10 % für alle Messstellen und GWK angenommen.
Im Rahmen der Nährstoffmodellierung Sachsen-Anhalt wird u.a. das Modell WEKU zur Fließzeitenmodellierung an der Grundwasseroberfläche eingesetzt. Dabei wird das durchflusswirksame Porenvolumen für Lockergesteinsregionen aus dem k_f-Wert berechnet. Für Festgesteinsregionen gelten aquiferspezifische Schätzwerte. Dabei variieren die Werte zwischen 0,3 % und 26 % bei einem Mittelwert von 18,1 % (Präsentation vom FZJ am 28.09.2023).

Im Folgenden wird für jeden Grundwasserkörper ein spezifischer Porositätswert gesucht mit dem, in Kombination mit dem Korrekturansatz zur Grundwasserneubildung, die hydraulische Altersberechnung weiter in Richtung der T/He-Alter korrigiert werden kann. Hierzu wird ein Algorithmus zur Parameterschätzung genutzt, der sowohl die jeweiligen Porositäten der GWK, als auch die Parameter der Korrekturfunktion zu Grundwasserneubildung (Gl. 5) optimiert, mit dem Ziel die Abweichung zum T/He-Alter zu minimieren. Die kleinste mögliche Porosität wurde hierbei mit 3 % festgelegt.
Die ermittelten Porositäten für die GWK sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Korrekturfunktion in Kombination mit den jeweiligen Porositäten eingesetzt in Gl. 2 lautet:

$$t_{Korr} = 5{,}1 \cdot \ln(GWN) - 0{,}76 \qquad \text{Gl. 6}$$

Bei Anwendung des kombinierten Korrekturansatz von Porosität und Grundwasseralter beträgt die mittlere Abweichung zwischen T/He-Alter und hydraulischem Alter für den Gesamtdatensatz MAE = 11,4 Jahre, R2 = 0,32 , NSE = 0,35. In Tabelle 2 sind neben den Porositäten auch die mittleren absoluten Fehler (MAE) und der NSE für die Grundwasserkörper aufgelistet. Dies verdeutlicht, dass die Annahme einer individuellen Porosität für jeden GWK sinnvoll ist und in den meisten Fällen eine niedrigere Porosität als 10 % zu einer besseren Übereinstimmung mit dem T/He-Alter führt.

Die Anpassung der hydraulischen Altersbestimmung an die T/He-Alter wird über diesen Korrekturansatz noch weiter verbessert werden (Abbildung 19). Allerdings bleibt eine starke Streuung der hydraulischen Alter bestehen.

Tabelle 2: Ermittelte Porositäten für die jeweiligen Grundwasserkörper zur Bestimmung des hydraulischen Grundwasseralters in Kombination mit dem Korrekturansatz Grundwasserneubildung. Die Werte in Klammern beziehen sich auf MAE bzw. NSE für den gesamten Datensatz.

Grundwasserkörper		Porosität [%]	MAE [Jahre]	NSE [-]
EN1	Westfläming und Elbtal (Ehle)	4,1	16,5	0,12
EN2	Leitzkauer Moränenplatte und Elbtal (Nuthe)	10,6	9,0	0,67
HAV_UH_6	Elbe-Urstromtal (Stremme)	4,7	7,5	-0,42
HAV_UH_7	Burg-Ziesar Fläming, Moränenlandschaft	3,5	11,9	0,36
MBA1	Altmärkische Moränenlandschaft (Milde)	6,6	6,9	0,42
OT1	Ohre-Urstromtal (Obere Ohre)	5,1	15,3	0,02
OT2	Colbitz-Letzlinger-Heide, Moränenlandschaft	10,4	15,0	0,13
OT3	Elbe-Ohre-Urstromtal	23,4	11,9	-0,02
SALGW02x	Wettiner Permokarbon; Hallesche und Köthener Moränenlandschaft; Akener Elbaue; Muldetal	3,0	7,3	-0,45
SALGW041	Helme-Unstrut-Aue	3,6	5,6	0,07
Mittelwerte		**7,5**	**10,7 (11,4)**	**0,09 (0,35)**

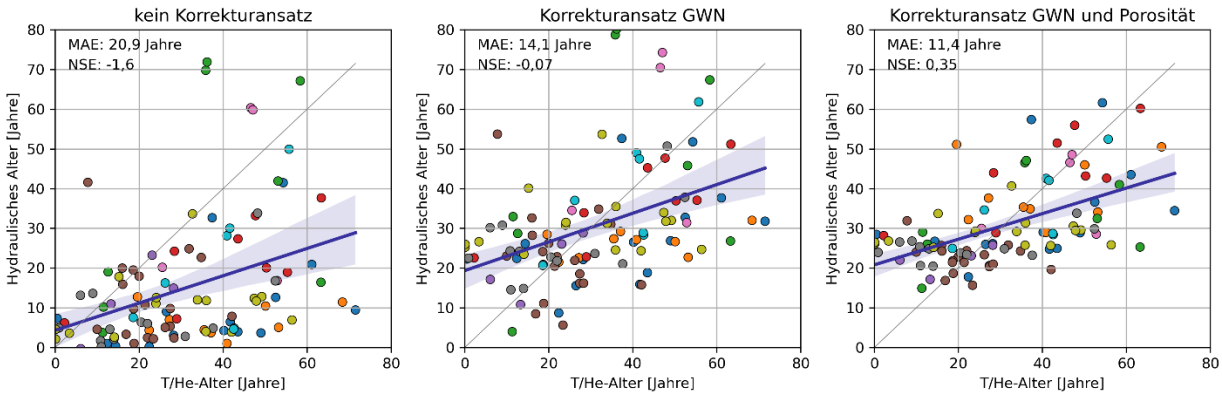

Abbildung 19: Vergleich der hydraulischen Alter zum T/He-Alter ohne Korrekturansatz (links), mit Korrekturansatz Grundwasserneubildung (Mitte) und Korrekturansatz Grundwasserneubildung und Porosität (rechts). Die blauen Schattierungen stellen die Konfidenzintervalle bei 95% eine linearen Regression durch die Datenpunkte dar. Die Farben entsprechen den GWK wie in Abbildung 18.

6.5 Multiple-Regressionsanalyse (PLS-Modell) zur Berechnung des Grundwasseralters

In der Studie BCE (2022) [5] wurde ein Ansatz vorgestellt, der eine Bestimmung des Grundwasseralter unabhängig von den hydraulischen Altersbestimmungen ermöglicht. Zwischen dem T/He-Alter und messstellenspezifischen sowie hydrochemischen Parametern wurden hierzu Spearman-Korrelationskoeffizienten (rho, p) berechnet. Dabei liegen einige signifikante ($p < 0{,}05$) Korrelationen vor, die hydrogeologisch plausibel zu erklären sind:

- Filterunterkante: Je tiefer die Filterunterkante unter GOK, desto höher ist das T/He-Alter. Dies ist auf die Zunahme des Grundwasseralters mit der Tiefe zurückzuführen. Eine Berücksichtigung der Filtertiefe ist daher unbedingt erforderlich, wenn mit Grundwasseraltern gearbeitet wird.
- Je niedriger das Redox-Potential, desto älter ist das Wasser: Dies weist auf die klassische Redox-Zonierung hin, die durch mikrobiologische Prozesse entsteht. Je länger die Aufenthaltszeit des Grundwasser im Untergrund ist, desto mehr Zeit haben die andauernden biogeochemischen Prozesse.
- Strombahnlänge: Je länger die Strombahn, ausgehend vom höchsten Grundwasserstand, desto älter ist das Grundwasser.
- Elektrische Leitfähigkeit: Je höher die Ionenkonzentration im Grundwasser ist, desto höher ist das Grundwasseralter. Dies ist wahrscheinlich auf die lange Zeit des Grundwasser im Untergrund zurückzuführen, während es zu einer Lösung von Mineralien kommt. Auch die Verknüpfung zur Redox-Zonierungen ist möglich (z. B. höhere Konzentration an reduzierten Metallen).

Die Parameter korrelieren sowohl mit dem T/He-Alter als auch untereinander. Zur mathematischen Beschreibung der Zusammenhänge ist die Methode der Multiplen Regression geeignet.

Hiermit ist es möglich die Zusammenhänge zwischen beliebig vielen Parametern auf die Zielvariable (hier: T/He-Alter) mathematisch zu beschreiben. Unter Verwendung einer Variante der Multiplen Regression, dem PLS-Model (Partial-Least-Square-Regression) werden zudem die Wichtigkeit der Variablen ermittelt (sog. VIP, Variable Importance in Projection).

Für den Gesamtdatensatz wurden aus den Spearman-Rangkorrelationen die Parameter ausgewählt, die den stärksten Zusammenhang zum T/He-Alter aufweisen. Dies sind die Filterunterkante, Strombahnlänge, Redox-Potential, elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert und die jeweiligen Ionenkonzentrationen von Sulfat, Kalium, Chlorid. Für die hydrochemischen Parameter wurden die jeweiligen Mittelwerte über die Analysen seit 2011 verwendet. Mit diesen Parametern wurde das PLS-Modell in sämtlichen Kombinationen (einzeln, 2-er, 3-er, …, 8er-Kombinationen) mit der Zielvariable T/He-Alter parametrisiert (T/He-Alter > 75 Jahren wurden nicht berücksichtigt). Das PLS-Modell liefert für jeden Parameter einen spezifischen Koeffizienten (x_i) sowie einen Wert, der dem y-Achsenabschnitt entspricht.

Das PLS-Modell aus dem Jahr 2022 mit Datensätzen aus den Jahren 2020, 2021 und 2022 wird um die Daten aus 2023 und 2024 ergänzt und die Parameter für diesen Gesamtdatensatz bestimmt
Mit den vier Parametern Filterunterkante, Strombahnlänge, Redox-Potential und elektrischer Leitfähigkeit kann das T/He-Grundwasseralter mit einer mittleren Abweichung von MAE = 10,2 Jahren (R^2 = 0,47; NSE = 0,47) bestimmt werden. Dabei wird deutlich, dass von diesen vier Parametern die Filterunterkante und das Redox-Potential die höchste Wichtigkeit (VIP > 1,0) aufweisen. Mit mehr als vier Parametern steigt die Anpassungsgüte an das T/He-Alter nicht mehr an. Werden nur Filterunterkante und das Redox-Potential zur Bestimmung des Grundwasseralters verwendet, liegt die mittlere Abweichung bei 10,2 Jahren (R^2 = 0,44; NSE = 0,44).

Auch für den Gesamtdatensatz können gute Übereinstimmungen mit den T/He-Altern ermittelt werden (Abbildung 20). In Tabelle 3 sind die Koeffizienten für das PLS-Modell mit zwei und vier Parametern zusammengefasst, die in den Gl. 7 und Gl. 8 einfließen.

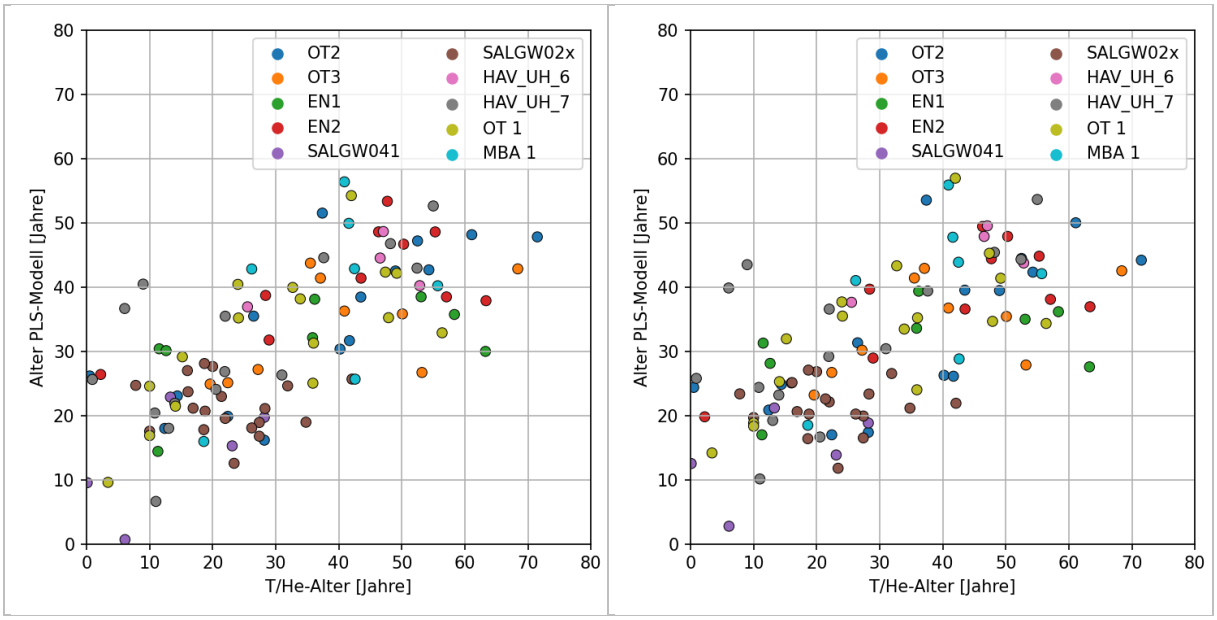

Abbildung 20: Anwendung der multiplen Regressionsanalyse auf den Gesamtdatensatz (2020 bis 2024). Links: Vergleich der T/He-Alter mit den prognostizierten Grundwasseraltern mit vier Parametern Filterunterkante, Redox-Potential, elektrische Leitfähigkeit und Strombahnlänge. Rechts: mit zwei Parametern Filterunterkante und Redox-Potential.

$$t_{PLS_2} = x_1 \cdot \log10(FiUK[m]) + x_2 \cdot Redox[mV] + b \qquad \text{Gl. 7}$$

$$t_{PLS_4} = x_1 \cdot \log10(FiUK[m]) + x_2 \cdot Redox[mV] + x_3 \cdot Strombahn[m] + x_4 \cdot EC[\mu S/cm] + b \qquad \text{Gl. 8}$$

Tabelle 3: PLS-Modell Parametrisierung mittels Koeffizienten und Wichtigkeit der Variablen (VIP).

Parameter	2 Parameter			4 Parameter		
	Koeffizient		VIP	Koeffizient		VIP
log10(Filterunterkante [m])	x_1	25,18	0,96	x_1	27,49	1,21
Redox-Potential [mV] (langjährige Mittelwerte 2011-2022)	x_2	-0,09	1,04	x_2	-0,06	1,33
Strombahnlänge [m]	x_3	-	-	x_3	3,81E-04	0,58
EC [µS/cm] (langjährige Mittelwerte 2011-2022)	x_4	-	-	x_4	2,92E-03	0,66
y-Achse [-]	b	20,27		b	11,26	

6.6 Zusammenhang zwischen Nitratabbau (N_2/Ar-Methode) und T/He-Alter

Die Ergebnisse der landesweiten Bewertung des Nitratabbaus (Denitrifikation) über die N_2/Ar-Methode aus [21] liegen als Nitratabbau als Anteil der Ausgangskonzentration sowie als Absolutwerte vor. Der Zusammenhang zwischen diesen Datensätzen und dem T/He-Alter ist schwach positiv, was im Sinne der hydrogeologischen Annahmen (Fließpfadtheorie) plausibel erscheint (Abbildung 21): Je älter das

Grundwasser ist, desto länger ist die Kontaktzeit zum Sediment und die mikrobiologischen Prozesse erzielen einen höheren Nitratabbau. Die Daten folgen diesen generellen Aussagen. Dabei ist anzumerken, dass für den Großteil der beprobten Messstellen die Nitratkonzentration sehr niedrig ist. Dies spiegelt sich auch im hohen Nitratabbau wider.

Allerdings hängt die Rate des Nitratabbaus von weiteren Parametern ab, die die mikrobiologischen Prozesse maßgeblich steuern. Hierzu zählen insbesondere die Verfügbarkeit von Reaktionspartnern (Nitrat, Kohlenstoff oder Eisensulfide) sowie ein anaerobes Milieu. Eine direkte Ableitung des Nitratabbaus über das Grundwasseralter ist daher nicht zweckmäßig.

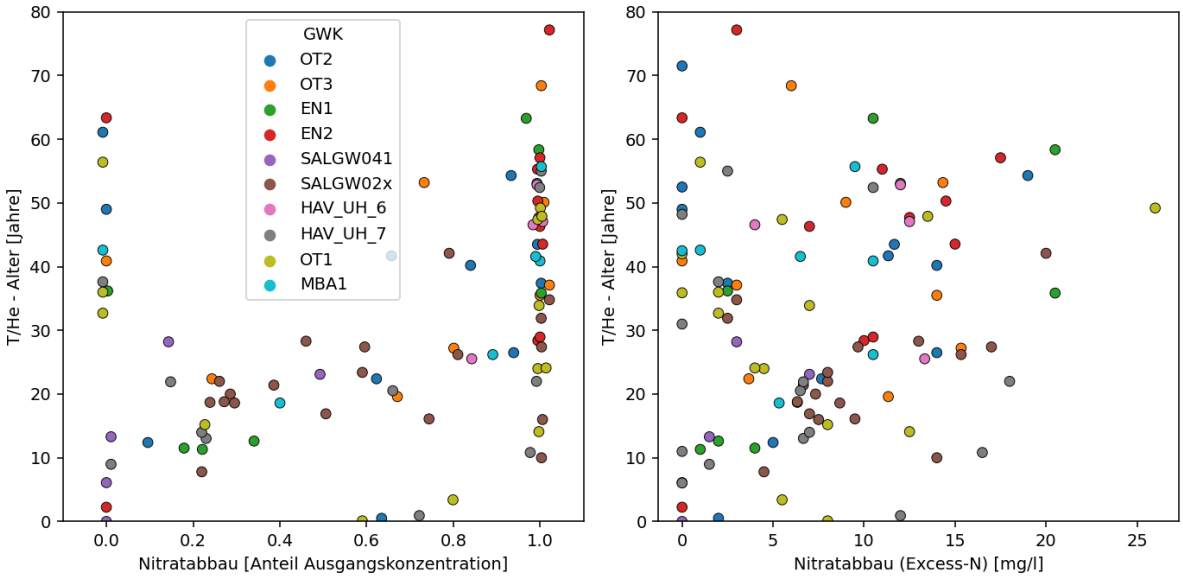

Abbildung 21: Vergleich zwischen Nitratabbau (abgeleitet aus der N_2/Ar-Methode) und dem T/He-Alter als Anteil der Nitrat-Ausgangskonzentration (links) und dem absoluten Nitratabbau in mg/l (rechts).

7 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen dieser Studie wurden zwei weitere Grundwasserkörper an insgesamt 24 GWM beprobt und hinsichtlich ihrer Grundwasseralter untersucht. Zum Vergleich wurde das Grundwasseralter mittels des hydraulischen Ansatzes nach dem Exponentialansatz berechnet. Es zeigt sich, wie auch in den Vorgängerstudien, eine generelle Unterschätzung durch die hydraulische Altersbestimmung. D. h. die hydraulischen Alter sind generell jünger als die T/He-Alter.
Der Korrekturansatz über die Grundwasserneubildung aus BCE (2022) führt zu einer verbesserten Bestimmung des Grundwasseralters. Das angewendete Multiple Regressionsmodell (PLS-Modell) liefert, wie auch in den Vorgängerstudien, robuste Grundwasseralter für den gesamten aktualisierten Datensatz.
Der Einfluss der Porosität wurde für den Gesamtdatensatz betrachtet und eine Erweiterung des Korrekturansatzes über die Grundwasserneubildung erarbeitet. Damit kann mittels hydraulischer Berechnungen und der Korrekturansätze das T/He-Alter noch besser nachgebildet werden.
Die verschiedenen Altersberechnungen für den Datensatz 2024 sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Die möglichen Gründe für die Differenzen zwischen den hydraulischen Altersberechnungen und dem T/He-Alter sind in Anlage A-4 zusammengestellt (nur für Differenzen größer als ±5 Jahre). Es zeigt sich hierbei, dass häufig die Aquiferbasis nicht aus den Schichtenverzeichnissen festgelegt werden

kann und aus umliegenden Bohrungen bestimmt werden muss. Hierdurch ergibt sich eine Unsicherheit bzgl. der gesättigten Aquifermächtigkeit, die in die Berechnung der hydraulischen Altersberechnung maßgeblich eingeht. Des Weiteren können eine Unterschätzung der Porosität und / oder eine zu hohe / zu niedrige Grundwasserneubildungsrate zu den beobachteten Abweichungen führen. Darüber hinaus ist die Verwendung der hydraulischen Altersbestimmung für tiefere Grundwasserstockwerke unter gespannten Verhältnissen wahrscheinlich ungeeignet. Es ist weiterhin zu beachten, dass bei einer Beprobung von unvollkommen Brunnen (Messstellenausbau umfasst nicht die gesamte Aquifermächtigkeit) auch Grundwasser unterhalb der Filterunterkante angesaugt und beprobt wird. Dies führt zur einem älteren T/He-Alter, als durch die Berechnung des hydraulischen Alters auf einer definierten Filterhöhe zu erwarten wäre.

Die aufgezeigten Ursachen für die Abweichungen zwischen hydraulischem Alter und dem T/He-Alter sind nicht ohne Weiteres zu korrigieren. Es gelingt zwar, mittels einer empirischen Korrekturfunktion über die Grundwasserneubildung und individuellen Porositätswert für die jeweiligen GWK die Übereinstimmung zu verbessern. Allerdings ist die Herangehensweise nach wie vor mit einer hohen Unschärfe verbunden.
Plausiblerer Ergebnisse mit den geringsten Abweichungen zum T/He-Alter liefert das PLS-Modell, sowohl mit zwei (Filterunterkante, Redox-Potential), als auch mit vier Parametern (Filterunterkante, Redox-Potential, Strombahnlänge und elektrischer Leitfähigkeit). Ein weiterer Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass die einfließenden Parameter mit geringer Unsicherheit zu bestimmen sind. Parameter mit einer hohen Unsicherheit in ihrer Bestimmung (z.B. Grundwasserneubildung, k_f-Wert, Porosität, Aquifermächtigkeit) fließen nicht in die Berechnung ein.
Die Anwendung der Ergebnisse des PLS-Modells ermöglicht damit eine genauerer Bestimmung des Grundwasseralters im Vergleich zu den derzeit standardmäßig verwendeten hydraulischen Verfahren (Exponentialmodell, Teufe-Neubildungsverfahren).

Tabelle 4: Zusammenstellung der verschiedenen Altersbestimmungen für den Datensatz 2023 (T/He-Alter, Hydraulisches Alter (Exp.-Modell), Korrigiert mittels der Grundwasserneubildung, PLS-Modell.

MST-Nr.	Name	T/He-Alter [a]	Hydraulische Altersbestimmung (Exp.-Modell)			PLS-Modell	
			-	GWN korrigiert [a]	GWN / Porosität korrigiert [a]	2 Parameter [a]	4 Parameter [a]
445096	Breitenfeld	47,4	12,4	33,9	30,6	45,2	40,7
341575	Bs 2/96 Bösdorf/Jahrstedt	14,1	2,6	23,4	25,2	25,3	19,4
440020	Dannefeld - Güte	49,2	12,8	31,9	29,6	41,4	37,9
445287	Elsebeck NB 2022	< 1	4,6	25,2	26,1	18,3	14,7
445161	Hanum nördlich	36	11,8	35,4	31,4	35,2	30,4
445137	Mieste	47,9	11,7	31,7	29,5	34,6	30,3
445149	Miesterhorst (Taterberg)	33,9	12,0	31,2	29,2	33,4	30,7
445015	Miesterhorst ICE	24	11,1	30,7	29,0	37,7	34,0

MST-Nr.	Name	T/He-Alter [a]	Hydraulische Altersbestimmung (Exp.-Modell)			PLS-Modell	
			-	GWN korrigiert [a]	GWN / Porosität korrigiert [a]	2 Parameter [a]	4 Parameter [a]
445171	Rappin (2010)	< 1	2,1	25,9	26,5	18,8	14,8
440031	Rätzlingen - Güte	42	3,9	24,3	25,7	56,9	53,4
440002	Solpke	35,9	4,0	24,5	25,8	24,0	19,2
445162	südlich Hanum	3,4	3,6	26,6	26,8	14,2	8,8
445163	südlich Jübar	15,2	17,8	40,1	33,7	31,9	28,4
445016	Weddendorf ICE	24,1	12,6	31,4	29,3	35,5	33,0
445049	Weddendorf Kanal	56,4	6,9	24,6	25,8	34,3	29,9
445098	Wenze	32,7	33,6	53,6	40,7	43,3	38,7
445024	Ackendorf, 13/68	40,9	28,1	49,0	42,6	55,9	51,9
445022	Altmersleben-Butterhorst	18,6	7,6	20,6	24,9	18,5	13,7
440003	Gardelegen - Güte	26,2	16,3	37,0	34,6	41,0	37,7
445154	Holzhausen (Bismark/Altmark)	55,7	49,9	61,8	52,4	42,1	38,2
445249	Jävenitz NB2016	42,6	4,9	28,3	28,4	28,8	23,7
445134	Kakerbeck	>75	10,9	10,9	29,8	44,1	40,3
445135	Querstedt	41,6	30,0	47,4	42,1	47,7	45,1
445025	Zienau	42,5	4,7	28,9	28,7	43,9	39,1

Aufgestellt:
Dr.-Ing. Nico Trauth

Leipzig, November 2024

Björnsen Beratende Ingenieure Erfurt GmbH